



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALLISSON MORAIS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO
3D NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS
USUAIS: UMA REVISÃO DE LITERATURA.**

CARAÚBAS - RN
2021

ALLISSON MORAIS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO
3D NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS
USUAIS: UMA REVISÃO DE LITERATURA.**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Pâmela Larissa de Sousa Vieira, Prof.

CARAÚBAS - RN
2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48e Oliveira, Allisson Moraes De.
 Estudo da influência de parâmetros de
 impressão 3D nas propriedades mecânicas de
 materiais usuais: uma revisão de literatura/
 Allisson Moraes De Oliveira. - 2021.
 76 f. : il.

 Orientadora: Pâmela Larissa de Sousa Vieira.

 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2021.

 1. Impressão tridimensional. 2.
 sustentabilidade. 3. resistência mecânica. I.
 Vieira, Pâmela Larissa de Sousa, orient. II.
 Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com
AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ALLISSON MORAIS DE OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE AS CONFIGURAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D E
SUAS INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CORPOS DE PROVA DO PLA; UMA REVISÃO DE LITERATURA.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA),
como exigência final para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Defendido Em:08/11/2021

BANCA EXAMINADORA

**PAMELA LARISSA DE SOUSA
VIEIRA:10600439470**

Assinado de forma digital por PAMELA
LARISSA DE SOUSA VIEIRA:10600439470
Dados: 2021.11.19 15:50:50 -03'00'

Prof^a. Pâmela Larissa de Sousa Vieira
Presidente

**ADIANA NASCIMENTO
SILVA:02620255406**

Assinado de forma digital por ADIANA NASCIMENTO
SILVA:02620255406
Dados: 2021.11.19 15:26:30 -03'00'

Prof^a. Dr^a. Adiana Nascimento Silva
Membro

**WENDELL
ALBANO:05837526404**

Assinado de forma digital por
WENDELL ALBANO:05837526404
Dados: 2021.11.24 18:15:32 -03'00'

Prof. Dr. Wendell Albano
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que apesar dos momentos difíceis fez com que minhas metas fossem alcançadas.

Aos meus familiares, meu pai Lindomar Militão, minha mãe Geruza Leite, minha irmã Alice Moraes, minha namorada Geycielle Silva, por todo apoio emocional e incentivo durante todos esses anos que estive dedicado a universidade.

A minha orientadora Prof. Pâmela Larissa de Sousa Vieira, por aceitar conduzir esse trabalho e por estar sempre presente me ajudando a concluir os objetivos, além de toda dedicação e confiança depositada. Os mesmos agradecimentos ao Prof. Victor de Andrade Dantas, que me ajudou em todo o processo e desenvolvimento do trabalho.

Aos professores e técnicos de laboratório que me ajudaram a realizar o experimento prático, mas devido ao momento pandêmico que vivemos atualmente no mundo, acabou não sendo possível a realização de tal experimento prático. mesmo assim agradeço por toda disponibilidade de ajuda cedida por todos

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo e por todos os momentos que ficaram guardados como um dos melhores já vivenciados em minha vida e me permitindo crescer como pessoa e como formando.

Aos professores, por todos os ensinamentos que me fizeram demonstrar um ótimo desempenho durante minha formação.

A UFERSA, pelo fornecimento de todos os dados e materiais essenciais para a minha formação ao longo do curso.

Por fim, a todas as outras pessoas que me incentivaram de forma direta ou indiretamente contribuindo assim, para minha formação e o sucesso desse trabalho.

A todos vocês, o meu muito obrigado.

RESUMO

A impressão 3D, também conhecida como uma manufatura aditiva, é uma tecnologia bastante utilizada na atualidade e nas mais diferentes áreas, chegando a minimizar consideravelmente os gastos com protótipos e produtos finais devido ao baixo custo para produção dos mesmos. A matéria prima utilizada é composta por filamentos, destacando-se os termoplásticos, entre os mais comuns temos o poli ácido láctico (PLA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Politereftalato de Etileno Glicol (PETG). Partindo desse princípio, o presente trabalho teve como objetivo fazer um levantamento bibliográfico mostrando suas propriedades mecânicas, características ecológicas, resistência, rigidez e outros fundamentos. E a partir de uma revisão bibliográfica de artigos escolhidos de acordo com os fundamentos de análise definidos, foi possível realizar comparações e definições acerca de parâmetros, tais como a porcentagem no preenchimento de impressão e o ângulo de varredura, além de comparações entre os materiais mais usuais na impressão 3D. Logo, foi possível concluir que tanto a porcentagem de preenchimento, como o ângulo de varredura influenciam diretamente em propriedades mecânicas de corpos de prova, e ainda o PLA como o material com resultados melhores em resposta aos ensaios mecânicos.

Palavras Chave: Impressão tridimensional, sustentabilidade, resistência mecânica.

ABSTRACT

3D printing, also known as additive manufacturing, is a technology widely used today and in many different areas, considerably minimizing expenses with prototypes and final products due to the low cost of producing them. The raw material used is composed of filaments, highlighting thermoplastics, among the most common are polylactic acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polyethylene Glycol (PETG) terephthalate. Based on this principle, the present work aimed to carry out a bibliographical survey showing its mechanical properties, ecological characteristics, strength, rigidity and other fundamentals. And from a bibliographical review of articles chosen according to the defined analysis fundamentals, it was possible to carry out comparisons and definitions about parameters, such as the percentage in the print filling and the scanning angle, as well as comparisons between the most important materials. common in 3D printing. Therefore, it was possible to conclude that both the filling percentage and the sweep angle directly influence the mechanical properties of specimens, and that PLA is the material with the best results in response to mechanical tests.

Keywords: Three-dimensional printing, sustainability, mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de FDM.....	17
Figura 2 - Mesoestrutura de peças fabricadas por extrusão.....	18
Figura 3 - Representação das camadas, parâmetros e orientação de construção.	19
Figura 4 - Densidades de preenchimento em %.	20
Figura 5 - Exemplo de estruturas de enchimento com diferentes densidades e orientações.	21
Figura 6 - Posicionamento do modelo para impressão.....	22
Figura 7 - Filamento PLA.....	24
Figura 8 - Posicionamento da amostra para realização do ensaio de flexão em três pontos.	30
Figura 9 - bobinas de filamento (a), amostra d filamento (b), peças fabricadas por injeção (c) e impressão 3D (d).	31
Figura 10 – Posições e ângulos para impressão dos corpos de prova	32
Figura 11 - Modelos de corpos de prova para ensaio de flexão (a) e ensaio de tração (b).	35
Figura 12 - Esquema de montagem das amostras para o ensaio de compressão axial. ..	36
Figura 13 - Preparação para o ensaio de flexão a três pontos.....	37
Figura 14 - Corpos de prova maciços, impressos verticalmente e identificado por cores (magenta PLA e branco ABS).	37
Figura 15 - Corpos de prova com malha estrutural interna, impressos verticalmente e identificados por cores (laranja PLA e branco ABS).	38
Figura 16 - Geometria auxética (a) e hexagonal (b) dos corpos de prova confeccionados.	38
Figura 17 - Variação do Modulo de Young.....	41
Figura 18 - Variação na tensão de escoamento.	42
Figura 19 - Variação na tensão de ruptura.....	42
Figura 20 - Variação da deformação na ruptura	43
Figura 21 - Variação da tenacidade	44
Figura 22 - Gráfico de colunas de força máxima dos CPs ensaiados.....	47
Figura 23 - Gráfico de colunas limite de resistência dos CPs ensaiados.....	47
Figura 24 - Gráfico das características mecânicas dos materiais no teste de flexão.	48
Figura 25 – Resistência mecânica dos corpos de prova em ABS impressos a 0°	52

Figura 26 - Resistência mecânica dos corpos de prova em ABS impressos a 45°	52
Figura 27 - Resistência mecânica dos corpos de prova em ABS impressos a 90°	53
Figura 28 - Resistência mecânica dos corpos de prova em PLA impressos a 0°	53
Figura 29 - Resistência mecânica dos corpos de prova em PLA impressos a 45°	54
Figura 30 - Resistência mecânica dos corpos de prova em PLA impressos a 90°	54
Figura 31 – Comparação de resultados entre corpos de prova em PLA impressos com orientação de infill a 45° e 90°	55
Figura 32 – Comparação de resultados entre corpos de prova em PLA e ABS impressos com orientação de infill 45°	56
Figura 33 - Comparação da força atuante sobre cada material ao longo do tempo do ensaio experimental	63
Figura 34 - Comparação dos valores das tensões dos dois materiais ensaiados.....	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média de tensão máxima (a) e do módulo de Young (b) em função dos níveis do ângulo de varredura	51
Gráfico 2 - Gráfico das tensões médias de flexão.	59
Gráfico 3 - Gráfico das tensões médias de tração.....	59
Gráfico 4 - Curva tensão de deformação para as amostras de PLA, com 0,50mm de espessura (P50).	61
Gráfico 5 - Curva tensão de deformação para as amostras de ABS, com 0,50mm de espessura (A50).	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D.....	26
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de impressão	29
Tabela 2 - Configurações de impressão para os diferentes grupos amostrais	29
Tabela 3 - Combinações paramétricas.....	31
Tabela 4 – Especificações dos corpos de prova.....	33
Tabela 5- Parâmetros para impressão 3D dos corpos de prova	34
Tabela 6 - Temperaturas de impressão relativas a cada material	34
Tabela 7 - características dos corpos de prova	39
Tabela 8 - características do ensaio de impacto.....	39
Tabela 9 - Característica dos provetes ensaiados à tração.	40
Tabela 10 - Distribuição dos CPs com a variação dos parâmetros.....	44
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração.....	45
Tabela 12 - Características mecânicas dos materiais utilizando teste de flexão em três	48
Tabela 13 - Resultados obtidos para o ensaio de tração e medição da massa	50
Tabela 14 - Resultados dos ensaios para o ensaio de tração.....	57
Tabela 15 - Resultados dos ensaios para o ensaio de flexão.	58
Tabela 16 - Resultados dos corpos de prova em ABS.....	60
Tabela 17 - Resultados dos corpos de prova em PLA	60
Tabela 18 - Resultado para os ensaios de flexão. Onde CP=corpo de prova, P=carga, I=momento de inercia, M=momento fletor máximo, W=modulo de resistência, σ =tensão de flexão de ruptura, Q=carga variável, V=esforço cortante, τ =tensão tangencial ou cisalhamento.	62
Tabela 19 - Resultados de compressão axial para os corpos de prova em ABS e PLA.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

PLA – Poli Ácido Lático

FDM - Modelagem por fusão e depósito

DIM - Direct Ink Writing

SHS - Selective heat sintering

PC - Polycarbonate

PS - Polystyrene

PEEK - Polyether Ether Ketone

ÂV - ângulo de varredura

OC - Orientação de construção

EP - Estratégia de preenchimento

PP - Percentual de preenchimento

NC - Número de contornos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	IMPRESSORAS 3D	15
2.2	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO.....	17
2.2.1	Densidade de preenchimento.....	20
2.2.2	Ângulo de varredura	21
2.2.3	Orientação de Construção	21
2.3	TEMPERATURA DE EXTRUSÃO	22
2.4	MATERIAIS UTILIZADOS EM IMPRESSORAS 3D.....	23
2.4.1	ABS	23
2.4.2	PETG	24
2.4.3	PLA	24
2.5	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	25
2.6	ASPECTOS TÉCNICOS E NOCIVOS.....	26
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	28
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	28
3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	28
3.2.1	Trabalho de Cardinali (2018)	28
3.2.2	Trabalho de Ambrós (2019).....	28
3.2.3	Trabalho de Shimano et al. (2018)	29
3.2.4	Trabalho de Santana et al. (2018)	30
3.2.5	Trabalho de Oliveira (2019).....	32
3.2.6	Trabalho de Moraes (2018)	33
3.2.7	Trabalho de Bolelli et al., (2019)	33

3.2.8	Trabalho de Peregrino et al., (2019)	35
3.2.9	Trabalho de Martinez (2019).....	35
3.2.10	Trabalho de Coutinho (2019).....	38
4	RESULTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	41
4.1	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DECORRENTES DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DA PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO	41
4.1.1	Trabalho de Cardinali (2018)	41
4.1.2	Trabalho de Ambrós (2019).....	44
4.1.3	Trabalho de Shimano et al (2018)	48
4.1.4	Panorama dos resultados	49
4.2	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DECORRENTES DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DO ÂNGULO DE IMPRESSÃO	50
4.2.1	Trabalho de Santana et al (2018)	50
4.2.2	Trabalho de Oliveira (2019).....	52
4.2.3	Trabalho de Moraes (2018)	55
4.2.4	Panorama dos resultados	56
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA DO PLA COM OUTROS MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS NA IMPRESSÃO 3D.....	57
4.3.1	Trabalho de Bolelli et al (2019)	57
4.3.2	Trabalho de Peregrino et al (2019)	60
4.3.3	Trabalho da Martinez (2019).....	60
4.3.4	Trabalho do Coutinho (2019)	63
4.3.5	Panorama dos resultados	64
5	CONCLUSÕES.....	66
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	67
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e aumento da industrialização, é evidente uma busca constante por uma produção padronizada em larga escala, de forma mais rápida e econômica possível, ou seja, uma relação entre preço, prazo e qualidade. Segundo Porto (2016), nos dias de hoje a robotização tem grande participação na produção das indústrias, tais como: carros, calçados, roupas e outros tipos de manufaturas. Logo, por ser uma produção automatizada e devido a outras vantagens, a impressão tridimensional apresenta uma tendência a se adequar a essa realidade.

Ainda de acordo com Porto (2016), a impressão tridimensional é a criação de um objeto sólido 3D a partir de um processo de fabricação que acumula camadas sobre camadas, permitindo a customização de vários componentes com formas mais complexas quando desejado e esses objetos são previamente desenhados em um computador com auxílio de softwares específicos.

De acordo com Santana (2018) a impressão 3D por ser uma manufatura aditiva, se opõe a outras tecnologias, onde os processos são do tipo de remoção de material (manufatura subtrativa), tais como: furação, fresamento, corte por serragem, entre outros. Quando comparadas, pode-se citar algumas vantagens, como: a eficiência, onde tem-se uma produção rápida e econômica, com perda de material mínima; criatividade, possibilitando uma fabricação de geometrias complexas; acessibilidade, preço razoável de máquinas e materiais.

Ainda segundo Santana (2018), com o sistema de código aberto, as máquinas de impressão tridimensional e equipamentos se tornaram uma tecnologia mais procurada quando se fala em preço e acessibilidade.

Essas impressoras 3D usam como matéria prima polímeros termoplásticos, em forma de rolo, em uma bobina. Esses filamentos tem a capacidade de serem moldados quando submetidos a altas temperaturas e quando retornam a temperatura ambiente, não modificam a sua forma confeccionada. Outra característica dos materiais termoplásticos é a capacidade de serem moldados diversas vezes, se apresentando como um material reciclável, devido as propriedades de flexibilidade e resistência (SANTOS et al, 2018).

O PLA (Poli Ácido láctico) é um dos materiais mais comuns no uso da impressão tridimensional, um de seus pontos positivos é ser um material biodegradável, com sua composição a base de extração de milho, trigo ou cana de açúcar. O tempo médio de decomposição do PLA é em torno de 6 a 24 meses, sendo muito importante e vantajoso

quando se fala em sustentabilidade e degradação na natureza. Além de ser uma fonte renovável, o PLA é dito como um os materiais mais fáceis de se trabalhar no processo de impressão tridimensional (SANTOS et al, 2018).

Logo, este trabalho buscará estudar e entender as características, principalmente do PLA, como também de outras matérias primas e a influência das diferentes porcentagens de preenchimento como também a ângulo de deposito dos filamentos na resistência mecânica no final do processo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

A pesquisa tem por objetivo estudar as configurações de impressão tridimensional e suas influências sobre propriedades do PLA na resistência mecânica de corpos de prova confeccionados com tal tecnologia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência das diferentes porcentagens de preenchimento;
- Analisar a influência do ângulo de varredura;
- Comparar resultados em resistência mecânico do PLA com outros materiais de uso frequente;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPRESSORAS 3D

Porto (2016) relata que estamos passando por uma nova revolução industrial, voltada ao modo de produção pelas impressoras 3D, onde essa tem a capacidade de criar objetos sólidos em três dimensões desenhados em computador. Permitindo então uma customização de objetos complexos, além de ter uma quantidade zero de resíduos, poeiras ou outras substâncias prejudiciais. Devido a tais vantagens, tal tecnologia tem sido bastante utilizada em diversas áreas, como na medicina, setor automotivo, aeroespacial e outros.

Os primeiros relatos de seu uso surgiram no início da década de 1980, denominados de tecnologia de Prototipagem Rápida devido a serem utilizados como um método rápido na criação de protótipos para o desenvolvimento de produtos dentro da indústria. A impressora 3D foi patenteada em 1986 por Charles Hull, apesar de Hull ter desenvolvido a tecnologia em 1983 como uma máquina de criação de lâmpadas para solidificação de resina e para confecção de partes de plástico de forma rápida (PORTO, 2016).

Várias são as tecnologias de impressão 3D nos dias atuais, e estas são distinguidas a partir de dois aspectos: no modo como as camadas de material são depositadas (por extrusão, polimerização, sinterização, laminação e outros) e no tipo de material utilizado (FERNANDES, 2016).

O modo por extrusão tem como destaque as tecnologias de *Fused deposition modeling* (FDM) e *Direct Ink Writing* (DIW), estas causam fusão do material e extrusão para formação da peça. No modo de polimerização, destaca-se a tecnologia de estereolitografia, esta utiliza feixe de luz ultravioleta para causar endurecimento no material líquido, causando assim a formação de cada camada da peça desejada.

Quanto ao modo de sinterização, destaca-se a tecnologia *Selective heat sintering* (SHS), onde o material em forma de pó passa por um processo térmico com geração de calor suficiente para a ocorrência de sinterização de tal material. Já na laminação tem-se a tecnologia de *Laminated Object Manufacturing*, onde o material em forma de “folha” com adesivo representa uma camada que é adicionada e cortada por um laser formando então a geometria camada a camada. (FERNANDES, 2016)

De acordo com Fernandes (2016), a tecnologia de modelagem por fusão e depósito (FDM) foi desenvolvida e patenteada por Scott Crump em 1988, esta impressora no início de sua comercialização não foi muito procurada e utilizada, devido a pouca divulgação

da tecnologia e distribuição restrita a uma única empresa (Stratasys, fundada em 1989 por Crump) na época. Anos depois com a patente expirada, ocorreu um crescimento significativo de sua aplicabilidade e hoje em dia é comum o uso de impressoras com tal tecnologia.

Santana et al., (2018) relata que essa expiração de patentes, teve como “consequência” a criação de uma comunidade focada em desenvolvimento de sistemas de código aberto. Assim, em poucos anos as máquinas tiveram seus preços reduzidos, o que tornou tal tecnologia acessível para uso doméstico e em escritórios.

Algumas impressoras de baixo custo são: DESKTOP REPRAP, MAKERBOT, CUBE, entre outras. E os principais materiais utilizados nessa classificação de impressoras 3D são os filamentos termoplásticos do tipo: Acrilonitrila Butadieno (ABS); Poli Ácido Lático (PLA); Politereftalato de etileno glicol (PETG); Policarbonato (PC) e o Nylon.

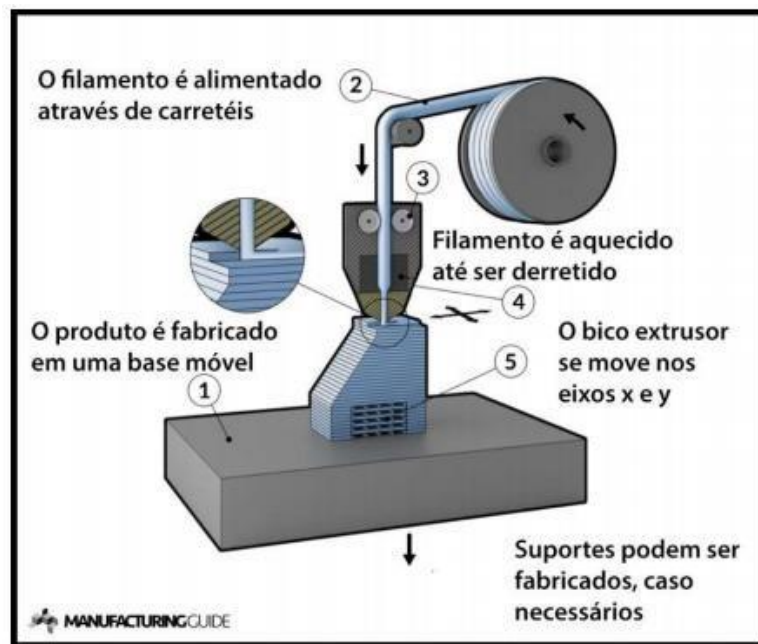
Segundo Volpato et al (2007), hoje em dia existem vários métodos de prototipagem rápida disponíveis no mercado, entre eles os de maior utilização são:

- Estereolitografia (SLA, Stereolithography): baseado na solidificação de camada por camada de uma resina líquida e curada a laser.
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS, Selective Laser Sintering): um laser de baixa potência pode sinterizar diversos tipos de materiais em pó, sejam estes metálicos, cerâmicos, policarbonatos ou náilon (FILHO & NAVEIRO, 2011).
- Modelagem por Fusão e Depósito (FDM, Fused Deposition Modeling): técnica em que a peça é processada a partir da extrusão de um filamento plástico.

O presente estudo, visa trabalhar com a tecnologia FDM, responsável pela prosperidade no processo de prototipagem, no qual teve como diferencial a sua velocidade de produção que é oferecida, transformando assim, a fabricação e estudos sobre componentes compostos constituídos de polímeros (LIU et al., 2019).

O processo FDM, representado pela Figura 1, trabalha com confecção em uma plataforma (1), produzindo pela extrusão e pelo endurecimento de um filamento de material termoplástico (2) aquecido, que é depositado constantemente (3), por meio de um cabeçote de extrusão (4) que se move no plano horizontal, construindo sucessivamente as camadas da peça (5).

Figura 1 - Representação do processo de FDM.



Fonte: manufacturingguide.com

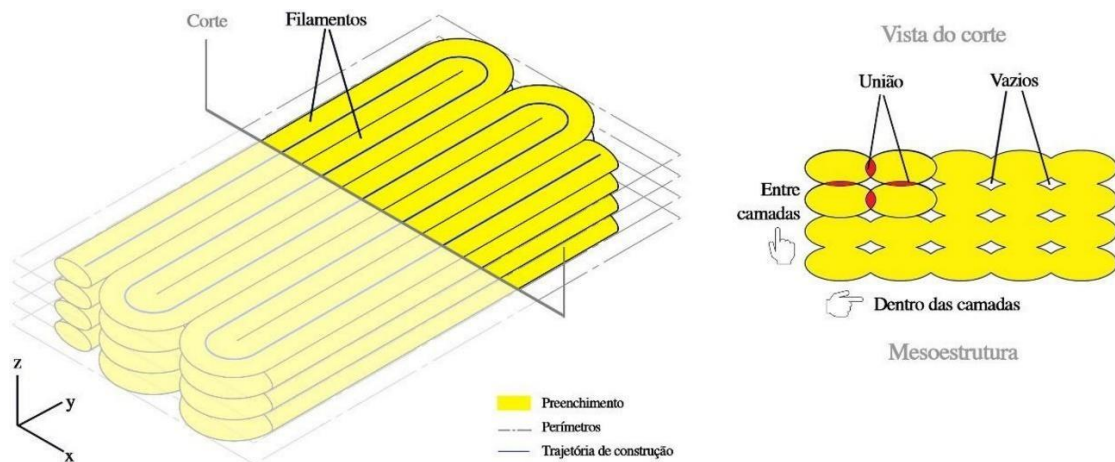
Em alguns casos são necessários a construção de suportes. Uma característica do FDM é a fabricação de um modelo de construção contínua, pois atravessa de uma camada para outra sem, ou quase sem, apresentar interrupção.

Os princípios do FDM são baseados na química de superfície, energia térmica e tecnologias de manufatura por camadas. Alguns aspectos são fundamentais para o desempenho satisfatório do processo, dentre eles estão a flexibilidade e resistência do material, a precisão do posicionamento do bico, sua taxa de fluxo volumétrico e seu diâmetro, a largura das linhas e velocidade de deposição, a temperatura do invólucro e, por fim a geometria das peças, esses são pontos importantes para um bom desempenho na hora da impressão (CHUA et al., 2010).

2.2 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

De acordo com Santana et al (2018), quando se fabrica utilizando o processo de impressão 3D por extrusão, verifica-se uma mesoestrutura (Figura 2) formada por uma densidade de vazios e ligações de filamentos depositados. No processo de impressão são determinados alguns parâmetros e trajetórias de deposição do filamento, assim, formando a mesoestrutura.

Figura 2 - Mesoestrutura de peças fabricadas por extrusão

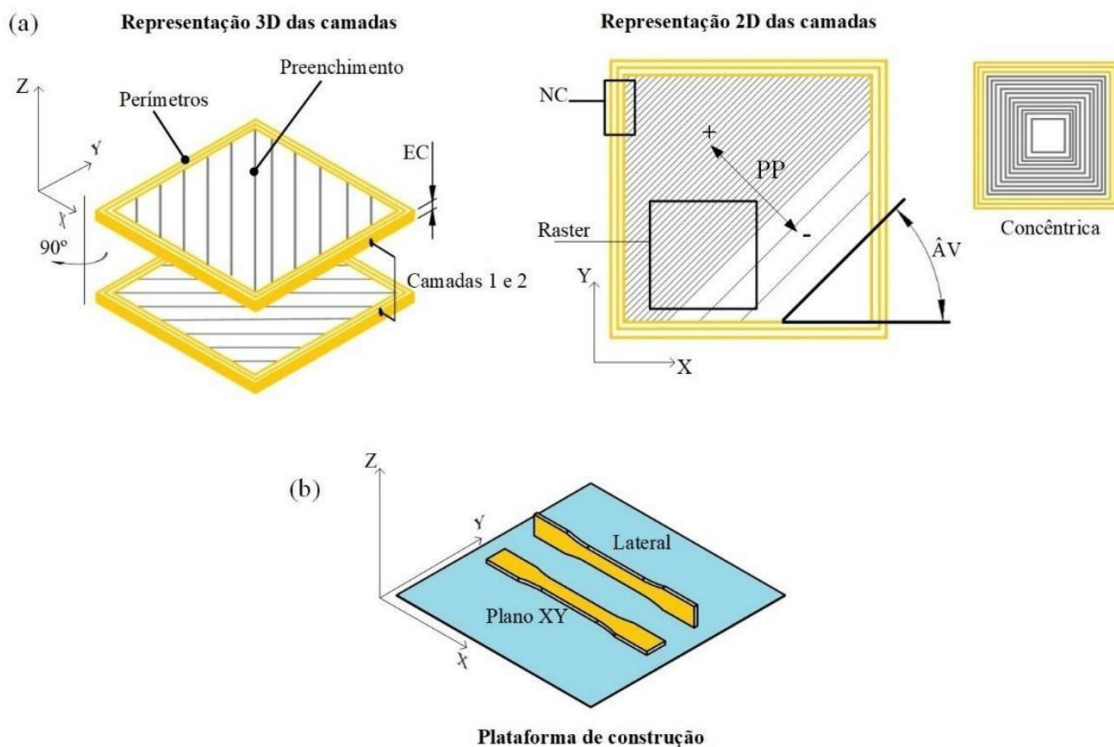


Fonte: Santana et al. (2018).

A presença de vazios no interior de peças fabricadas por esse processo, se dá devido a forma ovular dos filamentos que o formam. Logo, o tamanho e a forma de tais vazios, bem como a área de contato dos filamentos, são fatores que influenciam diretamente nas propriedades físicas e na resistência mecânica de peças confeccionadas por impressão 3D.

Fundamentado no conceito anterior e compreendendo a importância dos parâmetros na confecção de peças no processo de impressão 3D, alguns conceitos sobre tais parâmetros representados na Figura 3 devem ser definidos (SANTANA et al. 2018).

Figura 3 - Representação das camadas, parâmetros e orientação de construção.



Fonte: Santana et al. (2018).

- Espeçura de camada (EC): representa o valor da espeçura da camada depositada, com uma dependência do diâmetro do bico de extrusão, em sua maioria, é ajustável até 80% do diâmetro do bico.
- ângulo de varredura ($\hat{A}V$): representa a posição em que os filamentos depositados se encontram em relação ao eixo X na plataforma.
- orientação de construção (OC): representa a posição em que a peça se encontra em relação aos eixos X, Y e Z na plataforma. Os eixos X e Y são paralelos a plataforma, enquanto o eixo Z representa a direção de construção da peça.
- estratégia de preenchimento (EP): representa como o preenchimento interno da peça é realizado, geralmente em três possibilidades: o raster, que são os filamentos depositados em zigzag; concêntricos, que é a reprodução do perímetro ou perfil da peça; ou os dois em conjunto. Antes de iniciar esse preenchimento interno da peça, é importante definir o perímetro da peça a ser fabricada.
- percentual de preenchimento (PP): representa o quanto de material será depositado no interior da peça.

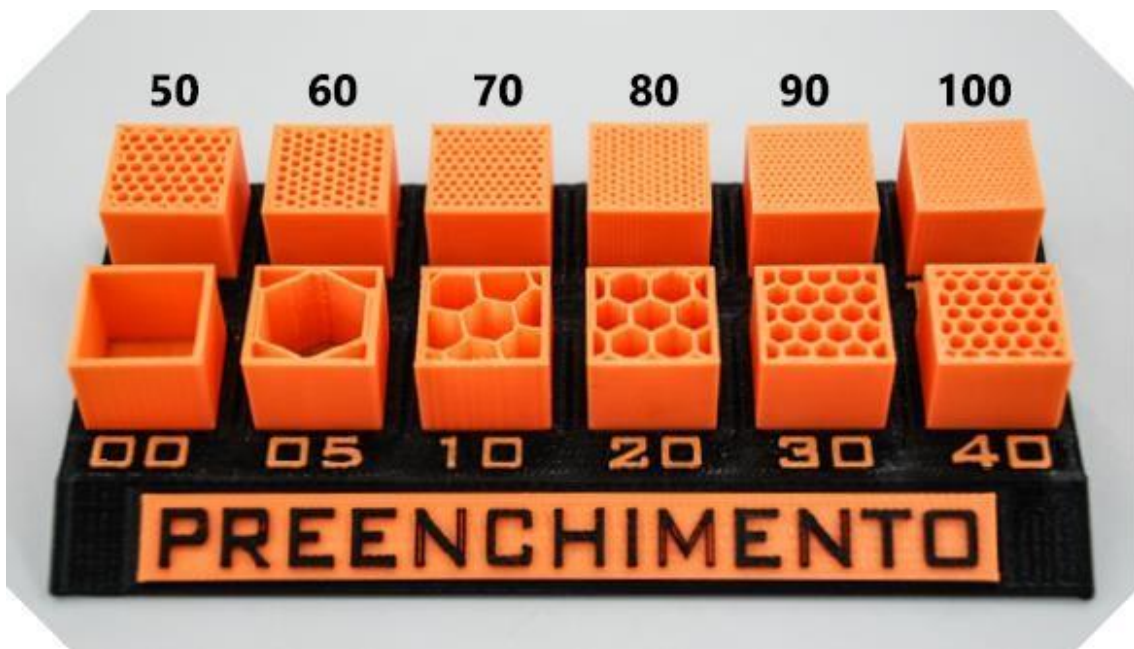
- f) número de contornos (NC): representa a quantidade de perímetros, internos e externos, estruturados ao redor da peça.

2.2.1 Densidade de preenchimento

A densidade de preenchimento é o parâmetro que define a quantidade de material a ser utilizado no processo, além do tempo de fabricação e resistência mecânica da peça fabricada, assim influenciando diretamente no processo de impressão 3D de peças confeccionadas (AMBRÓS, 2019).

Menta (2018) descreve que na impressão 3D as peças desejadas e fabricadas não precisam ser de forma sólida, visto que há tipos de preenchimento que atende à necessidade, além de economizar material e tempo de impressão. Vários são os tipos de preenchimento, tais como: hexagonal, grade, triângulos, linhas e concêntricos. Podendo também ser de várias densidades diferentes como exemplificado na Figura 4.

Figura 4 - Densidades de preenchimento em %.



Fonte: Menta (2018).

Coutinho (2017) define densidade de preenchimento como a quantidade de material a ser depositado para o preenchimento da peça e que tal quantidade é definida de acordo com o modelo, a resistência desejada, a velocidade de impressão e da especificação desejada da peça.

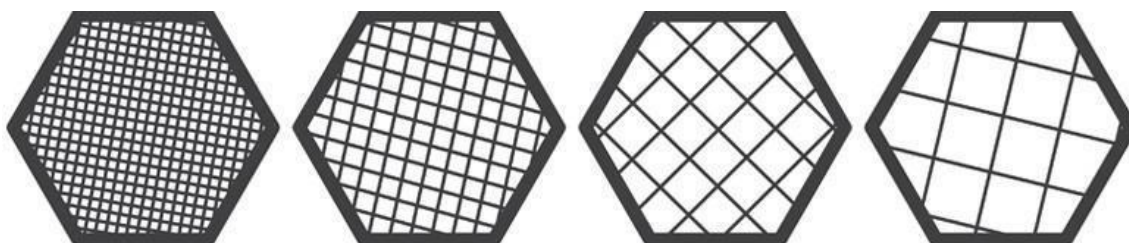
Logo, a porcentagem de preenchimento pode ser descrita como a porção de material que é utilizado em uma peça fabricada por impressão 3D, podendo ser totalmente

sólida representado por 100%, ou em densidades menores, como 25% ou 50% ou outras que necessitar.

2.2.2 Ângulo de varredura

Ângulo de varredura é a direção em que o preenchimento é realizado em relação ao eixo X da plataforma de construção (SANTANA, 2015). A Figura 5 mostra uma estrutura com densidade de preenchimento e orientação diferentes.

Figura 5 - Exemplo de estruturas de enchimento com diferentes densidades e orientações.



Fonte: Fernandes (2016).

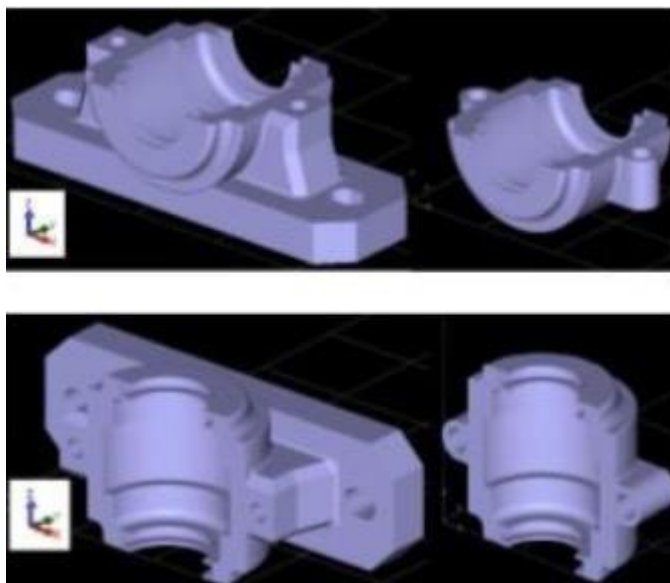
Segundo Casagrande (2018), ângulo de varredura é a trajetória em relação ao eixo X da máquina em que ocorre o preenchimento no processo de impressão tridimensional. Quando ocorre a alteração dessa trajetória, define-se como estratégia de preenchimento, podendo ser em três formas: varredura (zigzag), em contorno (ciclos equidistantes) e em varredura com contorno (combinação das duas anteriores).

2.2.3 Orientação de Construção

Conforme Ambrós (2019), a orientação é um aspecto decisivo na atividade da impressão tridimensional, pois além de definir a orientação da peça a ser fabricada, essa etapa ainda tem como compromisso determinar a quantidade de camadas a ser depositadas, além da quantidade de material suporte na fabricação quando necessário.

A orientação de construção de uma peça indica o quanto o processo pode ser caro, decorrente do tempo de fabricação e consumo de energia. Na Figura 6 tem-se orientações distintas para o mesmo processo de impressão tridimensional.

Figura 6 - Posicionamento do modelo para impressão.



Fonte: Ambrós (2019).

Logo, essa etapa de construção representa como a peça é posicionada na plataforma de construção, buscando a melhor maneira de preenchimento durante impressão. Em alguns casos se faz necessário a impressão de um suporte ou complemento para que seja possível a impressão da peça.

2.3 TEMPERATURA DE EXTRUSÃO

Santana et al., (2018) relata que na área da impressão 3D, o processo de modelagem por fusão e depósito (FDM), se diferencia por ser uma das técnicas mais comuns, isso por ter uma configuração de fácil uso e boa relação custo benefício.

De acordo com Menta (2018), para a técnica de modelagem por fusão e depósito é necessário o derretimento do material sólido por meio de altas temperaturas (200 a 300 Graus Celsius), realizando assim o processo de fusão e depois o processo de depósito por camadas sobre camadas até a formação da peça desejada. O material sofre fusão é depositado na base da impressora por um componente chamado bico extrusor.

De acordo com Fernandes (2016), o bico extrusor também pode ser chamado de cabeça de extrusão, onde em uma zona quente, o filamento é submetido a uma resistência elétrica que emite o calor necessário para o seu derretimento. E como o filamento não é de um único tipo de material, existe também um componente, denominado de “termopar” que é um sensor que tem a função de monitorar e auxiliar na regulação da temperatura, garantindo que cada material seja aquecido conforma sua temperatura de fusão.

De acordo com Santana (2015), o ajuste da temperatura de extrusão depende da viscosidade desejada e do ponto de fusão do material. Esse ajuste trabalha de acordo com três necessidades básicas:

1- Com intuito de facilitar o processo de extrusão durante movimentação do bico, é necessária uma viscosidade baixa do material, especificamente na região que ocorre o aquecimento;

2- Com objetivo de obter uma força de união suficiente entre camadas, é necessário amolecer a camada previamente depositada;

3- Com finalidade de se ter propriedades de adesão adequadas no filamento depositado.

2.4 MATERIAIS UTILIZADOS EM IMPRESSORAS 3D

Porto (2016) aponta que os materiais mais usuais na técnica de FDM (Modelagem por fusão e depósito) são termoplásticos pela facilidade de modelagem quando submetidos a uma certa temperatura específica, onde se tem uma viscosidade adequada para modelagem de várias geometrias desejadas, mantendo-as após arrefecimento.

Os materiais mais utilizados são o *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) e o *Polyacetic acid* (PLA), além de ter outros não muitos usuais como o *Polycarbonate* (PC), *Polystyrene* (PS) e *Polyether Ether Ketone* (PEEK).

Esses materiais são os mais utilizados devido as vantagens que apresentam, como por exemplo sua propriedade termoplástica, boa resistência mecânica, facilidade de uso e etc.

2.4.1 ABS

Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) é um termoplástico amorfo oriundo do petróleo, e como seu próprio nome define, ele é formado dos monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno. Suas características mecânicas o faz ser empregado em várias áreas da engenharia, indústria e no uso doméstico. A temperatura de extrusão média desse material é 225°C para o uso em impressão 3D (SANTANA, 2015).

O ABS tem como atributo alta tenacidade a fratura e resistência ao impacto e baixa densidade. Um ponto negativo do ABS é a fácil deterioração quando exposto a luz do sol, sendo então recomendado a aplicação a áreas internas. Na temperatura ambiente o ABS é estável e não prejudicial à saúde humana, já em elevadas temperaturas o mesmo tem propriedades cancerígenas (FERNANDES, 2016).

2.4.2 PETG

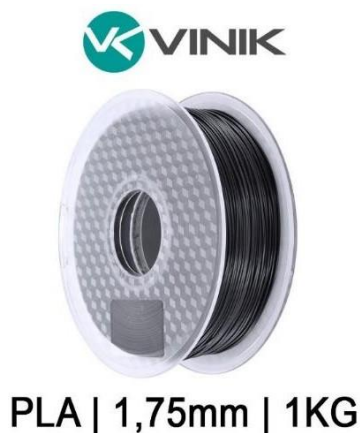
O Politereftalato de Etileno Glicol (PETG) tem ganhado muito espaço na área da impressão 3D, onde seus usuários e produtores de filamentos viram uma necessidade de construir peças mais flexíveis e com uma durabilidade maior. É basicamente uma união das qualidades dos dois últimos materiais citados (o PLA e o ABS), apresentando a resistência e ductilidade do ABS e uma impressão facilitada do PLA.

Como a sigla já apresenta, o PETG é o PET modificado, onde o “G” é proveniente do “glicol modificado”, sendo adicionado ao processo na polimerização. Assim, tornando-se um material menos rígido, transparente e com uma maior facilidade de uso em relação ao PET convencional. Ainda se caracteriza por ser amorfo, temperatura de transição vítrea próxima a 80°C, propriedades mecânicas equivalentes ao PET, acrescentado de notáveis tenacidade, flexibilidade, capacidade de processamento, preservação no estado semissólido quando aquecido, características essas que favorecem sua aplicação ao processo de impressão 3D (SANTANA et al. 2018).

2.4.3 PLA

Santana et al. (2018), relata que o PLA (Poli Ácido Lático) é um dos materiais mais populares quando se fala em impressão 3D, disponível por quase todos os fornecedores da tecnologia, além de ter em diversas cores para se escolher, (Figura 7).

Figura 7 - Filamento PLA



Fonte: Disponível em: <<https://www.casadarobotica.com/ver-mais/filamentos/pla/filamento-pla-para-impressao-3d-1-75mm-1kg-impressora-3d-cor-preta>>. Acesso em: 13 de abril de 2021.

Algumas vantagens do PLA são: facilidade em impressão; boas propriedades termomecânicas; boa resistência mecânica; baixo coeficiente de expansão térmica, influenciando positivamente a capacidade de impressão e reduzindo a possibilidade de empenamento na fabricação. Algumas desvantagens: sua fragilidade inerente; um

limitado alongamento até a ruptura e baixa resistência ao impacto (SANTANA et al. 2018).

O PLA ainda tem como característica ser um material termoplástico biodegradável, fabricado a partir de substâncias como o amido de milho, raízes de tapioca ou cana de açúcar, diferentemente de outros que são derivados do petróleo o PLA tem essa característica de ser ambientalmente recomendado. Há uma diferenciação quando se fala no PLA natural e com pigmentação, pois esta última quando usada para dar cor, influencia nas propriedades mecânicas do material, além de afetar a cristalinidade (FERNANDES, 2016).

Outra vantagem do PLA é seu aroma, visto que o mesmo é proveniente em sua maior parte de açúcares, sendo um fator importante na escolha do material, pois diferente de outros matérias que se tem um cheiro de “plástico queimado” quando trabalhados, o PLA apresenta um aroma “semi-doce” agradável.

Outra propriedade do PLA é a capacidade de ser mais fluido de que outros plásticos quando derretidos para trabalho, e com um bom processo de arrefecimento, torna-se possível a obtenção de detalhes com uma boa qualidade em comparação a outros plásticos (FERNANDES, 2016).

Santana et al. (2018), cita algumas propriedades do PLA, tal como: Resistência a tração em aproximadamente 50 a 70 MPa; modulo de elasticidade entre 3,0 a 4,0 GPa (dependendo da massa molar e composição estereoquímica); temperatura de transição vítrea entre 55 e 65 °C; ponto de fusão entre 170 a 180 °C quando semicristalino.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os ensaios mecânicos são importantes como testes para controle de qualidade da matéria prima em diferentes processos. Onde, para escolha de um material para um determinado projeto, é analisado suas propriedades mecânicas e seu comportamento mecânico. E essas características advêm de ensaios mecânicos normalizados.

Segundo Ambrós (2019) o ensaio de tração tem como função determinar várias propriedades de um material, sendo considerado o mais importante entre os ensaios mecânicos. E visto ainda como um procedimento relativamente fácil de ser executado.

Como resposta ao ensaio de tração, temos algumas propriedades mecânicas, são elas: o limite de escoamento, limite de resistência a tração, modulo de Young (elasticidade), tenacidade, ductilidade e outras. Esses dados são representados em forma

de digrama, o diagrama tensão-deformação, que representa a aplicação de carga pela deformação do material.

Conforme Fernandes (2016) uma das técnicas para caracterização mecânica de um material é a realização de ensaio de tração uniaxial, onde a amostra ou corpo de prova, é submetido a um estado de tração uniaxial controlado até a sua fratura. O corpo de prova como amostra para o ensaio experimental é normalizado de acordo com o material a qual é fabricado, seguindo então a norma para definição de seu dimensionamento, geometria e secção transversal retangular ou circular.

Para realização de tal experimento é utilizado uma máquina de testes universal, com um procedimento de ensaio também normalizado. A máquina é composta por uma garra, componente esse de fixação do corpo de prova, em cada extremidade. É importante saber as características da máquina utilizada, como a capacidade de carga e velocidade, conhecendo então se é capaz de aplicar a força necessária para a fratura do corpo de prova trabalhado e se é possível efetuar a velocidade desejada, mais rápida ou mais lento de acordo com a aplicação (FERNANDES, 2016).

2.6 ASPECTOS TÉCNICOS E NOCIVOS.

De acordo com Besko (2017), é importante estudar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na impressão 3D, bem como se faz necessário um levantamento acerca da sustentabilidade de tais materiais, onde pode-se saber quais os mais e menos nocivos ao meio ambiente.

Assim, de acordo com os quesitos ecológicos, tem como saber qual o material mais viável para uso, com intuito de uma busca por minimização de desperdícios.

Quadro 1 - Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D

Propriedades	PLA	ABS	PETG (PET,PTT)	NYLON	TPE,TPU e TPC	PC
Ecológico	alto	baixo	alto	baixo	alto	alto
Brilho	médio	baixo	alto	médio	médio	alto
Transparência	médio	baixo	alto	baixo	médio	alto
Rigidez/Dureza	médio	alto	alto	alto	baixo	alto
Resistência Impactos	baixo	médio	alto	alto	alto	alto
Flexibilidade	baixo	médio	médio	médio	alto	médio
Contração/WARP	baixo	alto	médio	baixo	médio	baixo
Precisão/Detalhes	alto	baixo	médio	alto	médio	alto
Qualidade de Superfície	alto	baixo	alto	alto	médio	alto
Resistência/Atritos	baixo	médio	alto	alto	baixo	alto
Resistência Química	médio	baixo	alto	alto	alto	alto
Resistência Temp.	baixo	alto	médio	alto	médio	alto
Usinabilidade	baixo	alto	baixo	alto	baixo	médio
Densidade	baixo	médio	baixo	baixo	médio	alto
Temp. de Impressão	médio	alto	alto	alto	alto	alto
Temp. Mesa Aquecida	baixo	alto	médio	alto	baixo	alto
Preço por m3/grama/hora	baixo	médio	médio	baixo	baixo	alto

Fonte: BESKO (2017).

De acordo com o Quadro 1, o PLA tem um alto desempenho ecológico e média rigidez/dureza. O PETG também é altamente ecológico, só que necessita de uma alta temperatura de impressão, característica em que o PLA é média.

Já o ABS, também necessita de alta temperatura de impressão e apresenta baixo desempenho ecológico, mas é importante lembrar que, por ser um material com excelentes propriedades mecânica e maior durabilidade, quando necessitar de peças com tais características, o ABS se torna mais viável que outros materiais. Pois, materiais com baixa durabilidade podem acarretar em uma substituição recorrente, com uma demanda de energia e matéria prima que se tornarão inviáveis.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para início de projeto, foi realizado um levantamento bibliográfico, procurando definições acerca da impressão 3D, tais como funcionamento, propriedades de impressão, materiais utilizados, sua viabilidade quanto a sustentabilidade, entre outros.

A pesquisa de caráter científico foi realizada via internet, livros e artigos, onde foram tomados os resultados experimentais de alguns trabalhos, servindo como embasamento para o desenvolvimento do assunto em uma revisão bibliográfica.

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Assim, buscando ainda entender melhor algumas propriedades mecânicas dos materiais mais comumente utilizados na impressão tridimensional, principalmente o Poli Ácido Lático (PLA), foi pesquisado sobre os processos de impressão 3D e outros materiais, que foram o ABS e o PETG, afim de tornar possível uma comparação entre materiais e qual dentre eles é o mais vantajoso.

Além de uma análise sobre os materiais, também foi realizado pesquisas com intuito de apresentar comparações e definições acerca de parâmetros de impressão. Dentre elas a porcentagem de preenchimento de impressão, onde se poderá estudar como a quantidade de material influenciam nas propriedades mecânicas. E o ângulo de varredura, onde se é possível estudar como direção em que o preenchimento é realizado em relação ao eixo X da plataforma de construção influência nas propriedades mecânicas de corpos de prova.

3.2.1 Trabalho de Cardinali (2018)

Cardinali (2018), em seu trabalho busca realizar comparações das propriedades macroestruturais através de ensaios de tração, para corpos de prova com diferentes porcentagens de preenchimento de impressão.

Primeiramente, Cardinali (2018) trabalhando com o filamento natural do PLA, analisa a influência da porcentagem de preenchimento e da espessura de camadas. Onde se explora uma porcentagem de preenchimento em 30, 50 e 80%. E espessura de camadas com 0,15, 0,20 e 0,25mm.

3.2.2 Trabalho de Ambrós (2019)

Ambrós (2019) em seu trabalho verificou a influência de alguns parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com PLA para o ensaio de tração. Os parâmetros analisados foram: porcentagem de preenchimento, espessura das paredes e altura entre camadas.

A impressora 3D utilizada é uma CLIEVER do modelo CL2 PRO PLUS. Os corpos de prova foram confeccionados seguindo a norma ASTM D 638-2a. O ensaio de tração foi realizado em uma máquina de ensaios universal EMIC DL-2000, utilizando cédula de carga com 5000N e velocidade de 5mm/min (AMBRÓS, 2019).

3.2.3 Trabalho de Shimano et al. (2018)

Shimano et al. (2018), definiu alguns parâmetros iniciais a partir de experimentos prévios, ajustando-os para uma melhor qualidade dos corpos de prova. Parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de impressão

Parâmetros (inglês)	Parâmetros (português)	Valor
<i>Layer height</i>	Espessura das camadas	0,25 mm
<i>First layer height</i>	Espessura da primeira camada	0,35 mm
<i>Vertical shells</i>	Camadas laterais	3
<i>Horizontal shells</i>	Camadas horizontais	3 na base e 3 no topo
<i>Seam Position</i>	Posição de início de cada camada	Randômico
<i>Fill density</i>	Densidade de preenchimento	15% ou 30%
<i>Fill pattern</i>	Padrão de preenchimento	Rectilinear
<i>Fill angle</i>	Ângulo do preenchimento	45°
<i>Speed perimeters</i>	Velocidade do perímetro	30 mm/s
<i>Speed small perimeters</i>	Velocidade de perímetros pequenos	30 mm/s
<i>Speed external perimeters</i>	Velocidade do perímetro externo	25 mm/s
<i>Speed infill</i>	Velocidade do preenchimento	30 mm/s

Fonte: SHIMANO et al. (2018).

De acordo com o estudo de Shimano et al. (2018), foram definidos como parâmetros para análise, demonstrados na Tabela 2, o percentual de preenchimento na confecção de corpos de prova com 15% e 30%. A escolha de tais valores de preenchimento tiveram a finalidade de reduzir o tempo de impressão, além da redução de massa e consequentemente do custo final na produção.

Tabela 2 - Configurações de impressão para os diferentes grupos amostrais

	% preenchimento	Estratégia de decomposição	Ângulo de varredura	Espessura das camadas
PLA – 15	15	Tipo raster	45°	0,25 mm
PLA – 30	30	Tipo raster	45°	0,25 mm
ABS – 15	15	Tipo raster	45°	0,25 mm

ABS – 30	30	Tipo raster	45°	0,25 mm
----------	----	-------------	-----	---------

Fonte: SHIMANO et al. (2018).

Com finalidade de estudar a influência de diferentes percentuais no preenchimento de filamento na impressão 3D, Shimano et al. (2018), submeteu os corpos de prova a ensaios de flexão em três pontos e de compressão. Com tais testes, foi possível se ter resultados em força máxima, rigidez e deformação até a força máxima.

O ensaio de flexão tem como objetivo avaliar qual corpo de prova tem menor resistência em uma determinada situação (crítica). Já o ensaio de compressão, além da caracterização dos materiais utilizados, permitiu analisar a influência da porcentagem de preenchimento (SHIMANO et al. 2018).

Em seu trabalho os autores, Shimano et al. (2018), confeccionaram 40 corpos de prova, sendo 10 para cada condição. Impressora utilizada foi uma GTMax^a 3D – modelo cora A1, cujo diâmetro de bico extrusor era de 0,4mm (SHIMANO et al. 2018).

O ensaio de flexão representado na Figura 8, foi realizado em máquina universal de ensaios modelo WDW – 1000E da marca TIME Group Inc. ensaio de flexão com apoio em três pontos, como mostrado na Figura 8. Utilizando uma célula de carga máxima com capacidade de 4,905kN (SHIMANO et al. 2018).

Figura 8 - Posicionamento da amostra para realização do ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: SHIMANO et al. (2018).

3.2.4 Trabalho de Santana et al. (2018)

Santana et al., (2018) aborda algumas combinações paramétricas, cujos detalhes estão específicos na Tabela 3, tais como: diferentes ângulos de varredura ($\hat{A}V$), diferentes estratégias de preenchimento (ED) e diferentes orientações de construção (OC).

Tabela 3 - Combinações paramétricas

CONDIÇÃO	CONFIGURAÇÃO PRINCIPAL	PARAMETROS AUXILIARES	
	ÂV (°)	ED (u.a)	OC (u.a)
C1	45/-45	Raster	Plano XY
C2	0/90	Raster	Plano XY
C3	Unidirecional (0°)	Concêntrica	Lateral

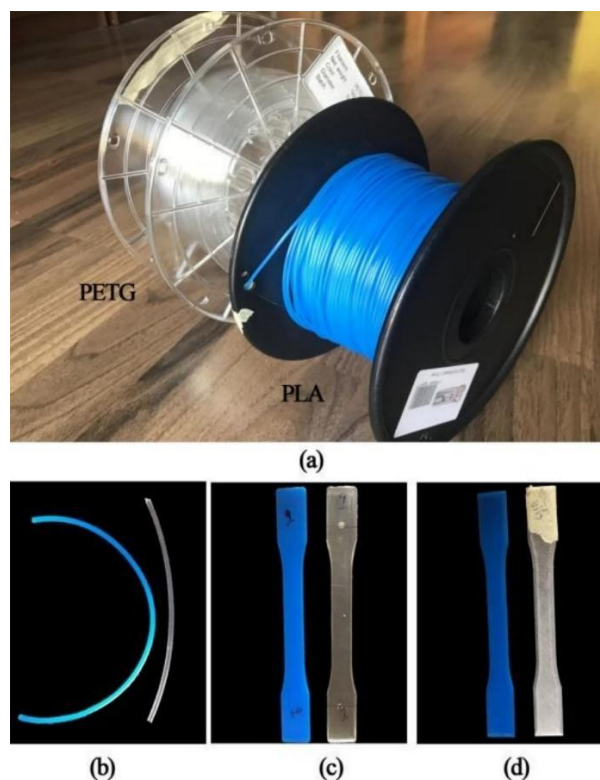
Fonte: SANTANA et al. (2018).

Tais combinações, nesse caso, tem como objetivo avaliar a influência dos ângulos de varredura na qualidade e propriedades mecânicas das peças confeccionadas (SANTANA et al. 2018).

No trabalho elaborado por Santana et al. (2018), foram utilizados filamentos poliméricos com diâmetro de 1,75mm. O PLA da empresa 3D INK, de cor azul. O PETG fornecido pela RepRap.pt, de cor transparente.

Na Figura 9 observa-se as condições em que os materiais se encontravam em cada fase do processo: fase 1, filamento (a) e (b); fase 2, confeccionado por tecnologia de moldagem por injeção (c); fase 3, confeccionado por manufatura aditiva por extrusão (d).

Figura 9 - bobinas de filamento (a), amostra d filamento (b), peças fabricadas por injeção (c) e impressão 3D (d).



Fonte: SANTANA et al. (2018).

Utilizando uma impressora 3D modelo Prusa I3 Hephestos (BQ) (diâmetro o bico extrusor = 0,4mm), foram confeccionados cinco corpos de prova para cada condição, totalizando assim quinze peças por material (SANTANA et al. 2018).

Alguns parâmetros foram mantidos fixos para o processo de confecção dos corpos de prova, tais como: a espessura de camada, com 0,2mm; número de perímetros, com três; percentual de preenchimento, com 100%. Além desses parâmetros, adequaram-se algumas configurações para o processo, tais como: temperatura de extrusão do PLA, com 215°C; temperatura de extrusão do PETG, com 235°C; temperatura da plataforma de extrusão, com 70°C para ambos os materiais (SANTANA et al. 2018).

Quanto ao ensaio de tração, foi realizado em um equipamento modelo 4507 Instron, com cédula de carga de 250kN e velocidade de ensaio de 5 mm/min (SANTANA et al. 2018).

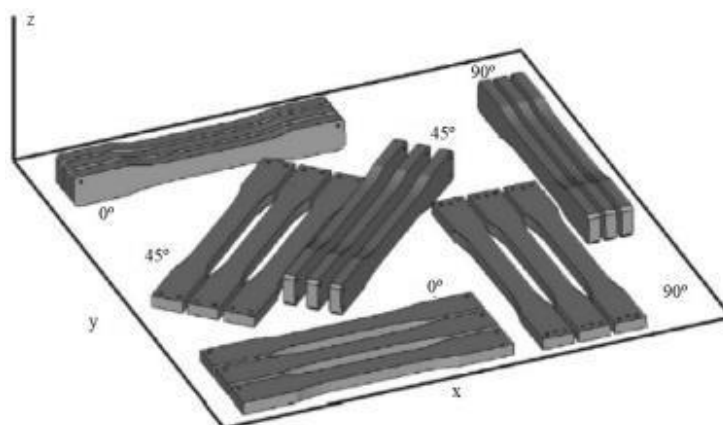
E para medição da massa foi utilizada uma balança Kern als, max 250g e 0,1 mg de resolução (SANTANA et al. 2018).

3.2.5 Trabalho de Oliveira (2019)

Oliveira (2019), com intuito de caracterizar o comportamento mecânico de materiais poliméricos, PLA e ABS, em função do ângulo de impressão, é realizado a confecção de corpos de prova e submetido esses a ensaio de tração axial.

A impressora utilizada para confecção dos corpos de prova foi uma ANET modelo A8. Seguindo padrões internacionais e parâmetros pré-estabelecidos, como temperatura de bico, temperatura de mesa, velocidade de impressão, altura entre camadas, densidade, entre outras. E dentre esses parâmetros, tem-se a variação para análise do parâmetro ângulo de impressão, onde varia entre 0°, 45° e 90° como mostrado na Figura 10 (OLIVEIRA, 2019).

Figura 10 – Posições e ângulos para impressão dos corpos de prova



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Quanto a caracterização mecânica, Oliveira (2019) realizou ensaio de tração em uma máquina do tipo servopulser da marca SHIMADZU, com capacidade de carga de dez toneladas, levantando a carga suportada e alongamento dos corpos de prova.

3.2.6 Trabalho de Morais (2018)

Morais (2018), com objetivo de estudar as impressoras open-source FDM, trabalhou com filamentos em ABS e PLA, realizando testes de tração para uma melhor análise das características mecânicas desses polímeros utilizados em impressão 3D. A impressora utilizada foi uma Graber I3, imprimindo conforme as normas ISO 527 e ASTM D 790.

Com os corpos de prova fabricados, foi possível obter dados quantitativos e qualitativos das características mecânicas dos materiais a partir de um ensaio de tração. Os dados são vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações dos corpos de prova

	Especificações do corpo de prova (mm)
Comprimento	50
Largura	12.5
Espessura	4
Impressora	Graber I3
Material	ABS (CP 3-1 a 3-4)
	PLA (CP 4-1 a 4-5 e 5-1 a 5-5)
Temperatura	ABS: 95 °C
	PLA: 65 °C

Fonte: MORAIS (2018).

3.2.7 Trabalho de Bolelli et al., (2019).

De acordo com o estudo realizado por Bolelli et al. (2019), foram realizadas impressões 3D a partir dos filamentos de PETG, ABS, PLA e TPU (poliuretano termoplástico). Todos os materiais foram confeccionados com os mesmos parâmetros de densidade de preenchimento, orientação na deposição, velocidade e geometria, o único parâmetro o qual distinguiram foram os de temperatura de impressão, visto que cada material tem sua própria temperatura de fusão.

Nas Tabelas 5 e 6 observa-se os parâmetros de confecção dos corpos de prova do trabalho de Bolelli et al. (2019).

Tabela 5- Parâmetros para impressão 3D dos corpos de prova.

Formato do preenchimento interno	Triangular
Velocidade de impressão	35 mm/s
Largura a extrusão	0,4 mm
Densidade de preenchimento	50%
Quantidade e camadas solidas nas paredes laterais	3
Quantidade de camadas solidas superiores	2
Quantidade de camadas solidas inferiores	2
Espessura de cada camada	0,2 mm
Orientação da deposição dos filamentos	0°
Diâmetro dos filamentos	1,75mm

Fonte: BOLELLI et al. (2019).

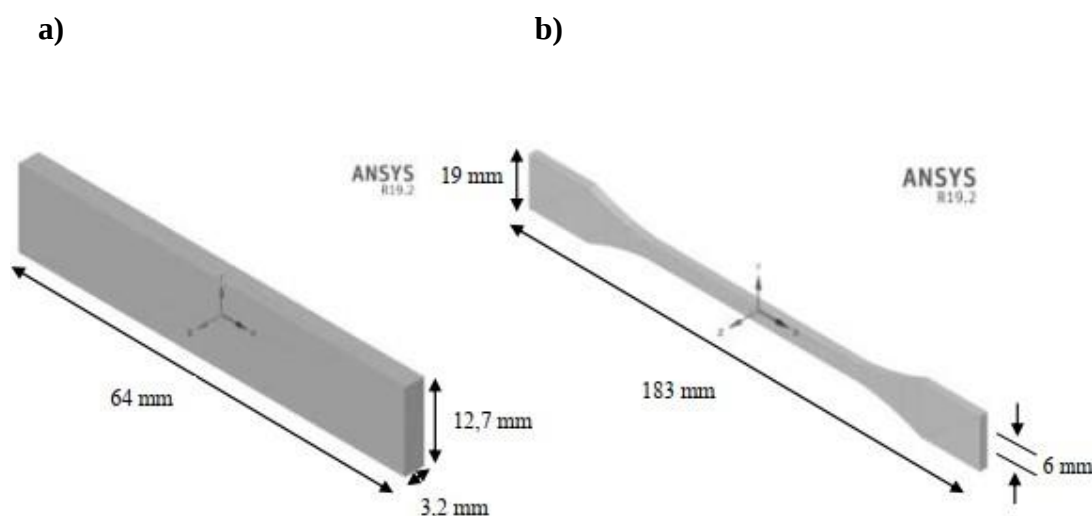
Tabela 6 - Temperaturas de impressão relativas a cada material

Materiais	Temperatura de impressão
PLA com cobre	217 °C
PLA com alumínio	217 °C
PLA com bronze	217 °C
PLA om fibra de carbono	217 °C
ABS condutivo	235 °C
PETG	260 °C
PLA (branco, preto e cinza)	217 °C
ABS (branco, preto e cinza)	217 °C
TPU	240° C

Fonte: BOLELLI et al. (2019).

Bolelli et al. (2019), se baseou nas normas ASTM D790, ASTM D638 e ASTM D256 para criar modelos geométricos dos protótipos a serem utilizados nos ensaios de flexão e tração, Figura 11 (a) e (b) respectivamente. Com objetivo de determinar qual o material mais resistente quando confeccionado em uma impressora 3D, além de analisar as propriedades de cada material.

Figura 11 - Modelos de corpos de prova para ensaio de flexão (a) e ensaio de tração (b).



Fonte: BOLELLI et al. (2019).

3.2.8 Trabalho de Peregrino et al., (2019)

Peregrino et al (2019), apresenta dois materiais em seu estudo, o PLA e o ABS. Onde, por meio de ensaio de tração, busca realizar uma comparação das características mecânicas de peças fabricadas por impressão 3D.

Para fabricação dos corpos de prova foi utilizado uma impressora do tipo STRATASYS FORTUS 250mc para os corpos de prova em ABS e uma CREALITY 10S PRO para os corpos de prova em PLA. Para ambos os materiais se produziu 5 corpos de prova empregando preenchimento sólido e posição horizontal (com relação a plataforma de construção da impressora).

Já para realização do ensaio de tração, foi utilizado uma máquina EMIC DL30000N, com velocidade em 10mm/min e célula de carga em 20kN.

3.2.9 Trabalho de Martinez (2019)

Martinez (2019), visa em seu trabalho apresentar resultados de ensaios de compressão axial e flexão em três pontos utilizando os polímeros PLA e ABS como corpos de prova confeccionados em impressora 3D. objetivando a avaliação do comportamento mecânico desses materiais.

Para realizar impressão dos corpos e prova, foi utilizado uma impressora 3D modelo CUBEX DUO, possibilitando uma otimização no consumo de matéria prima, reduzindo os custos e o tempo de impressão.

Foram fabricados dois tipos de corpos de prova, cada qual para um ensaio específico, sendo cilindro para o ensaio de compressão, como mostrado na Figura 12 e paralelepípedo para o ensaio de flexão em três pontos como mostrado na Figura 13.

Figura 12 - Esquema de montagem das amostras para o ensaio de compressão axial.



Fonte: MARTINEZ (2019).

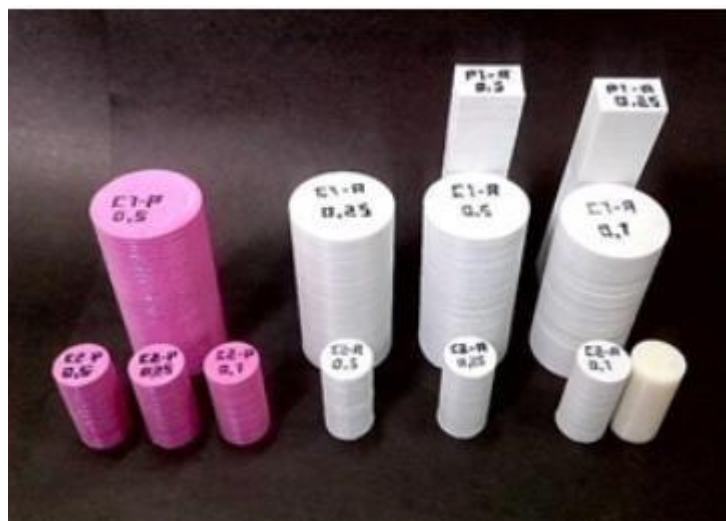
Figura 13 - Preparação para o ensaio de flexão a três pontos.



Fonte: MARTINEZ (2019).

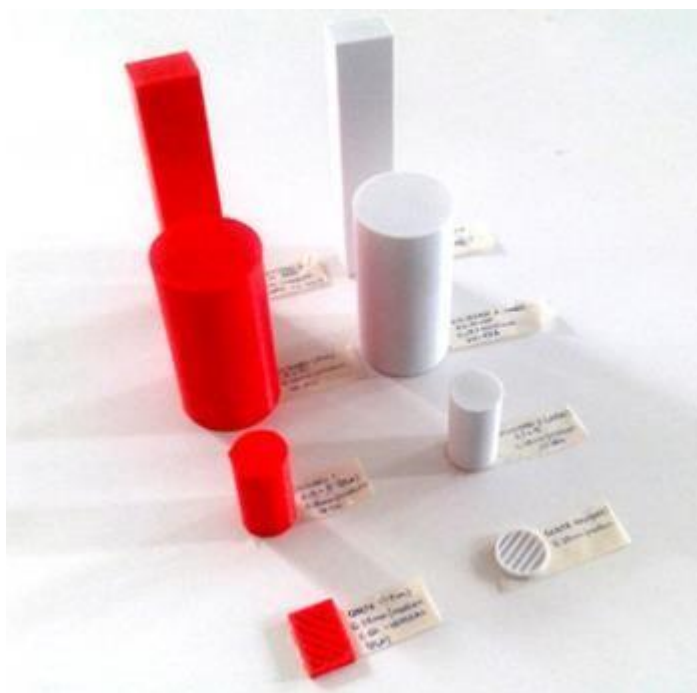
Martinez (2019), escolheu como parâmetro de análise a espessura das camadas e fabricou corpos de prova maciços como mostrado na Figura 14 e com malha estrutural interna mostrado na Figura 15. Os corpos de prova foram identificados com a letra “A” para ABS e a letra “P” para o PLA, seguido da numeração decorrente da espessura das camadas, sendo 50 para 0,50mm, 25 para 0,25mm e 10 para 0,10mm de espessura.

Figura 14 - Corpos de prova maciços, impressos verticalmente e identificado por cores (magenta PLA e branco ABS).



Fonte: MARTINEZ (2019).

Figura 15 - Corpos de prova com malha estrutural interna, impressos verticalmente e identificados por cores (laranja PLA e branco ABS).

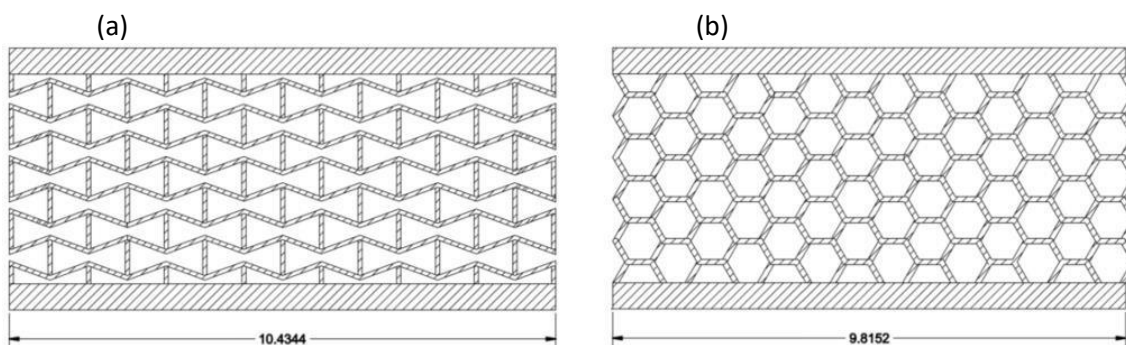


Fonte: MARTINEZ (2019).

3.2.10 Trabalho de Coutinho (2019)

Coutinho (2019), em seu trabalho utilizou o PLA e o PETG em condições semelhantes para análise em ensaios de impacto e de tração axial. Os corpos de prova tiveram sua confecção em dois tipos de geometrias, como mostrado na Figura 16, auxético e hexagonal. A impressora utilizada foi uma PRUSA 3D: modelos MK2 e MK3. Foram fabricados então 12 corpos de prova, com propriedades de massa e espessuras das paredes, apresentadas na Tabela 7.

Figura 16 - Geometria auxética (a) e hexagonal (b) dos corpos de prova confeccionados.



Fonte: Coutinho (2019).

Tabela 7 - características dos corpos de prova.

	Massa do proвете [g]	Espessura das paredes [mm]	Número de provetes
Auxético em PLA	248	0,80	3
Auxético em PETG	256	0,85	3
Hexagonal em PLA	225	1,00	3
Hexagonal em PETG	230	1,05	3

Fonte: Coutinho (2019).

Primeiramente, se trabalhando com teste de impacto, Coutinho (2019) dividiu o ensaio em duas partes, onde se usou energia de impacto distintas (1ª série e 2ª série representadas na Tabela 8), variando as alturas de modo a ajustar a energia de impacto (J). Essas energias foram escolhidas a partir de experimentos prévios. Logo, se utilizando de uma máquina de impacto ROSAND IFW5 INSTRUMENTED, com pêndulo de massa conhecida (4,853g), foi possível se obter dados como a velocidade de impacto e a força exercida na superfície de contato.

Tabela 8 - características do ensaio de impacto.

	Ordem de ensaio	Características do proвете	Altura de queda [m]	Velocidade de impacto [m/s]	Energia de impacto [J]
1ª Série	1	Hexagonal - PETG	0,46	3,01	22,00
	2	Hexagonal - PLA	0,46	3,01	22,00
	3	Auxetico - PETG	0,47	3,04	22,40
	4	Auxetico - PLA	0,44	2,95	21,05
2ª Série	5	Hexagonal - PETG	0,24	2,18	11,49
	6	Hexagonal - PLA	0,23	2,10	10,72
	7	Auxetico - PETG	0,21	2,04	10,08
	8	Auxetico - PLA	0,23	2,12	10,85

Fonte: Coutinho (2019).

Ao se trabalhar com o ensaio de tração, Coutinho (2019) se utiliza de 6 provetes ou corpos de prova, com 3 em PLA e 3 em PEG, com as características apresentadas na Tabela 9. A máquina para realização do ensaio de tração foi uma ZWICK.

Tabela 9 - Característica dos provetes ensaiados à tração.

		Massa [g]	d₁ [mm]	d₂ [mm]
PLA	1º Proвете	16,15	13,94	6,05
	2º Proвете	16,16	13,95	6,15
	3º Proвете	16,17	13,91	6,04
PETG	1º Proвете	15,91	14,20	6,37
	2º Proвете	15,84	14,05	6,38
	3º Proвете	15,80	14,20	6,44

Fonte: Coutinho (2019).

4 RESULTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

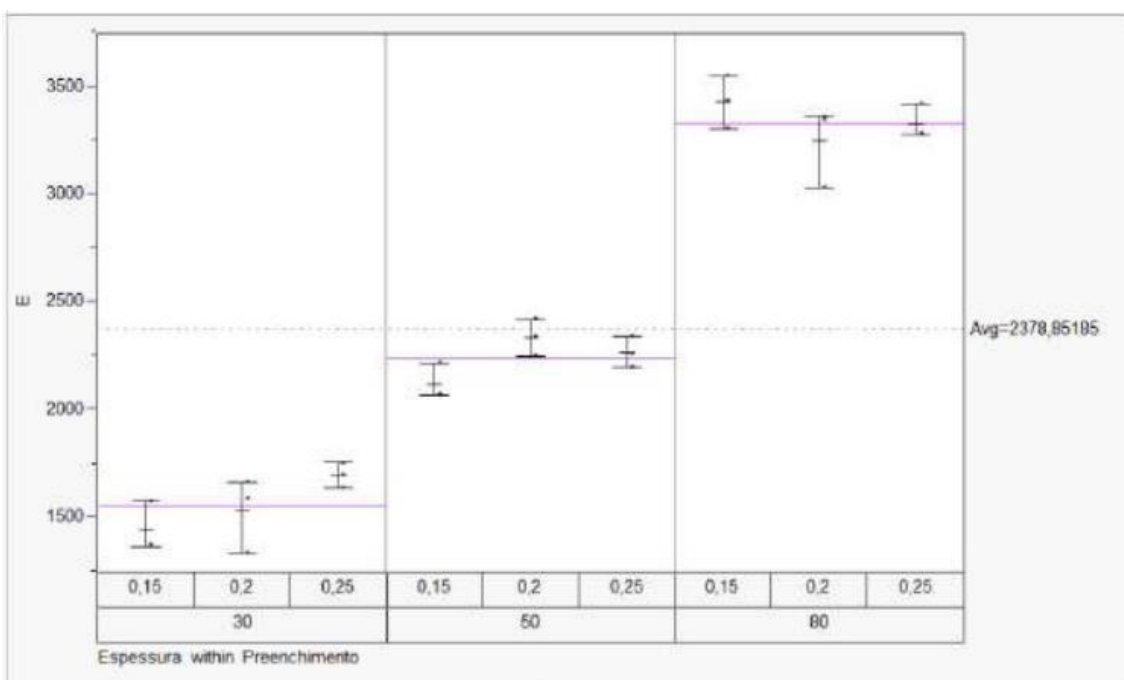
4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DECORRENTES DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DA PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO

4.1.1 Trabalho de Cardinali (2018)

Logo, com os resultados adquiridos, Cardinali (2018) observa uma grande influência da porcentagem de preenchimento no módulo de Young, na tensão de escoamento, na tensão de ruptura e na tenacidade. Já a espessura de camadas só apresenta resultados significativos em deformação e tenacidade.

No comportamento do módulo de Young em função da variação de preenchimento levantado por Cardinali (2018), Figura 17, verifica-se que a variação dessa propriedade é independente da espessura da camada, sendo influenciada pelo percentual de preenchimento.

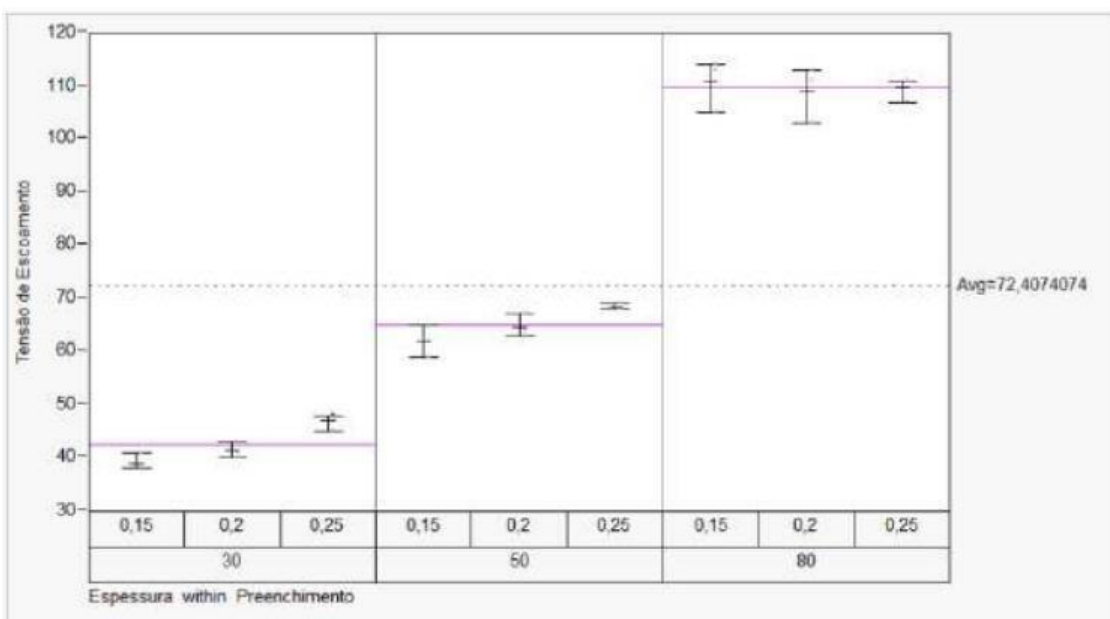
Figura 17 - Variação do Modulo de Young.



Fonte: CARDINALI (2018).

Com relação a tensão de escoamento, Figura 18, Cardinali (2018) verificou comportamento semelhante, onde tem-se uma alta variação na porcentagem de preenchimento e uma variação insignificante na espessura de camada.

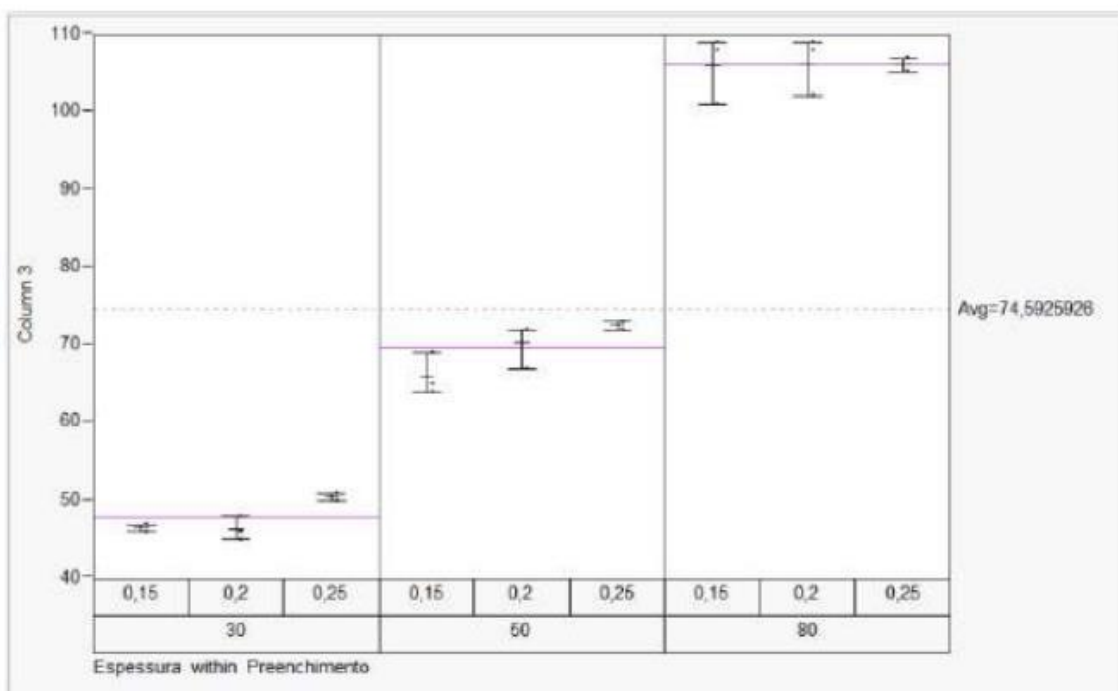
Figura 18 - Variação na tensão de escoamento.



Fonte: CARDINALI (2018).

Quanto a tensão de ruptura, Figura 19, Cardinali (2018) observou um comportamento semelhante aos do módulo de Young e da tensão de escoamento. Com uma variação na porcentagem de preenchimento considerável, enquanto em espessura de camada uma variação irrelevante.

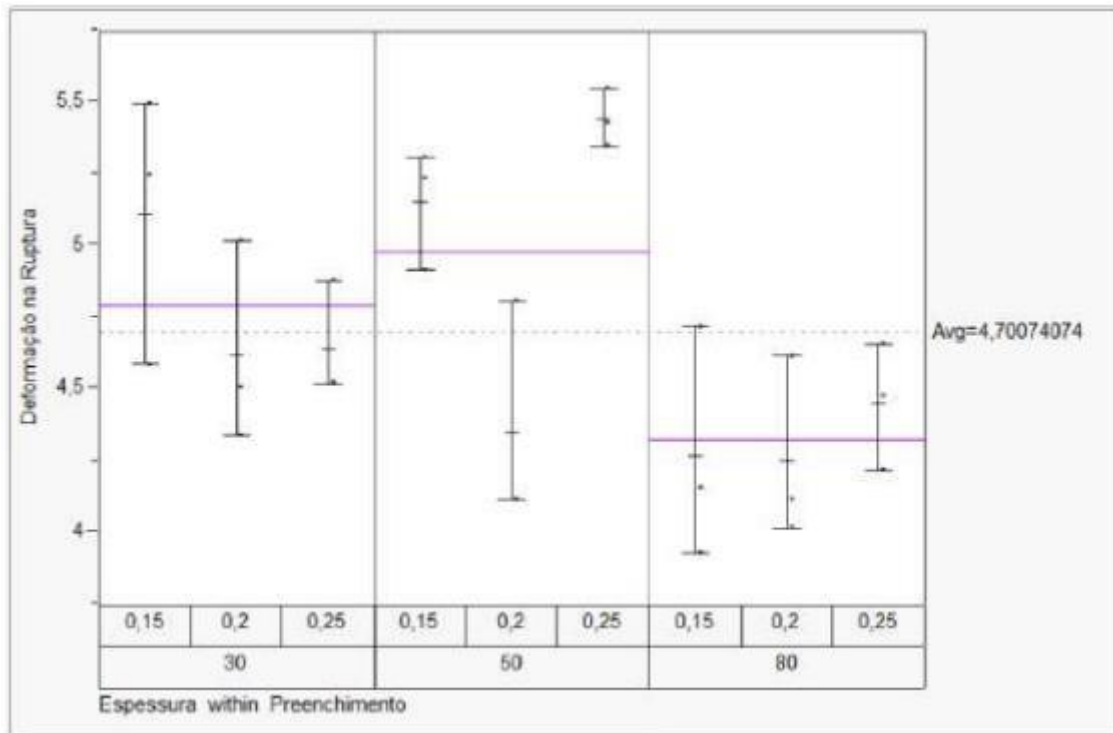
Figura 19 - Variação na tensão de ruptura.



Fonte: CARDINALI (2018).

A deformação na ruptura, de acordo com Cardinali (2018), não apresentou variação com os parâmetros trabalhados, mostrando uma diferença de 0,75mm (4,25mm à 5mm) de deformação entre os corpos de prova ensaiados. Dados na Figura 20.

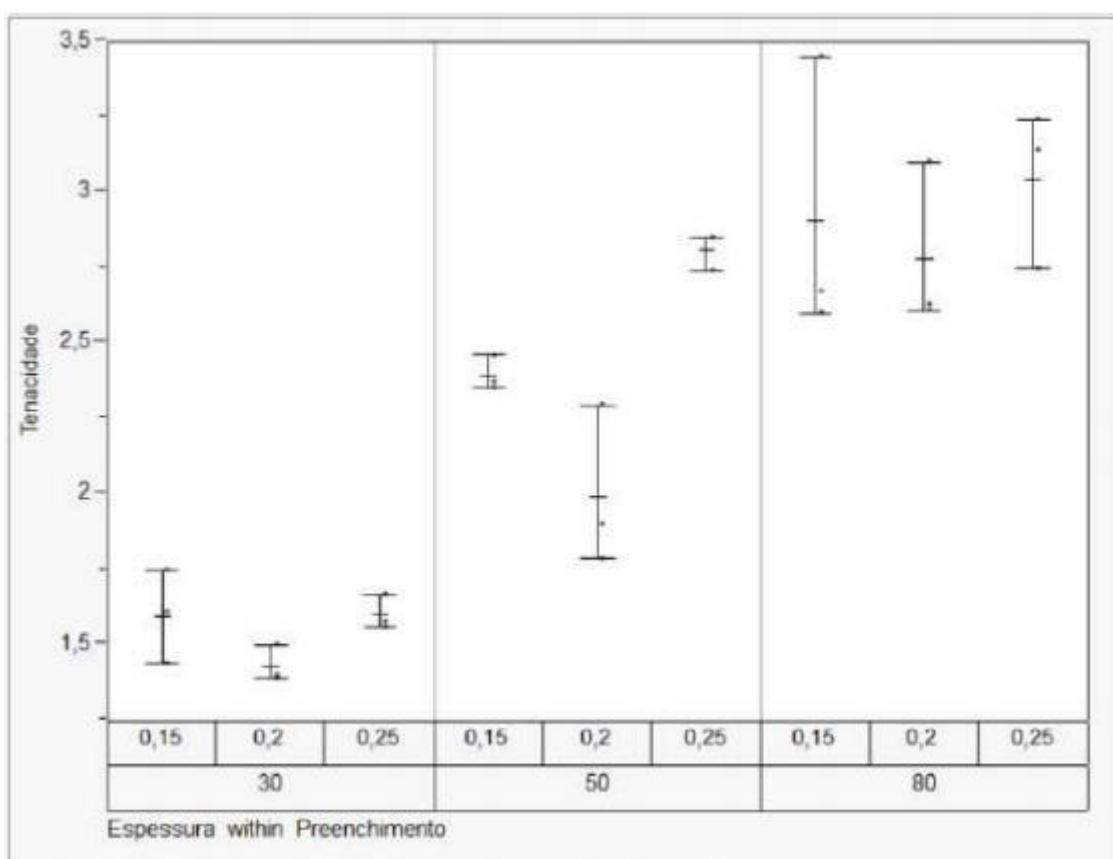
Figura 20 - Variação da deformação na ruptura.



Fonte: CARDINALI (2018).

Quanto a tenacidade, é visto por Cardinali (2018) um efeito significativo na espessura de camada no preenchimento em 50%, onde em 0,20mm apresenta uma variação maior que as espessura com 0,15mm e 0,25mm. Dados na Figura 21.

Figura 21 - Variação da tenacidade.



Fonte: CARDINALI (2018).

4.1.2 Trabalho de Ambrós (2019)

Ambrós (2019) definiu 3 variáveis para cada parâmetros, gerando 27 combinações diferentes como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Distribuição dos CPs com a variação dos parâmetros.

Corpo de Prova	Preenchimento (%)	Espessura de parede (perímetros)	Altura entre Camadas (mm)
1A	10	2	0,15
2A	10	2	0,19
3A	10	2	0,25
4A	10	3	0,15
5A	10	3	0,19
6A	10	3	0,25
7A	10	4	0,15
8A	10	4	0,19

9A	10	4	0,25
10A	25	2	0,15
11A	25	2	0,19
12A	25	2	0,25
13A	25	3	0,15
14A	25	3	0,19
15A	25	3	0,25
16A	25	4	0,15
17A	25	4	0,19
18A	25	4	0,25
19A	50	2	0,15
20A	50	2	0,19
21A	50	2	0,25
22A	50	3	0,15
23A	50	3	0,19
24A	50	3	0,25
25A	50	4	0,15
26A	50	4	0,19
27A	50	4	0,25

Fonte: AMBRÓS (2019).

Com a devida distribuição e o ensaio de tração realizado, Ambrós (2019) obteve os seguintes resultados demonstrados no Tabela 11 quanto a força, tensão e deformação.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração

CP	Força máxima (kN)	Tensão efetiva máxima (MPa)	Módulo de tenacidade (Nmm/mm ²)	Módulo de elasticidade (MPa)	R ² (%)
1A	1,00	18,60	0,54	346,58	97,59
2A	1,20	22,79	0,75	415,80	95,89
3A	1,30	25,16	0,72	431,60	96,46
4A	1,17	21,40	0,63	409,14	95,89
5A	1,26	23,63	0,72	410,65	95,50
6A	1,53	29,15	0,99	495,83	95,76

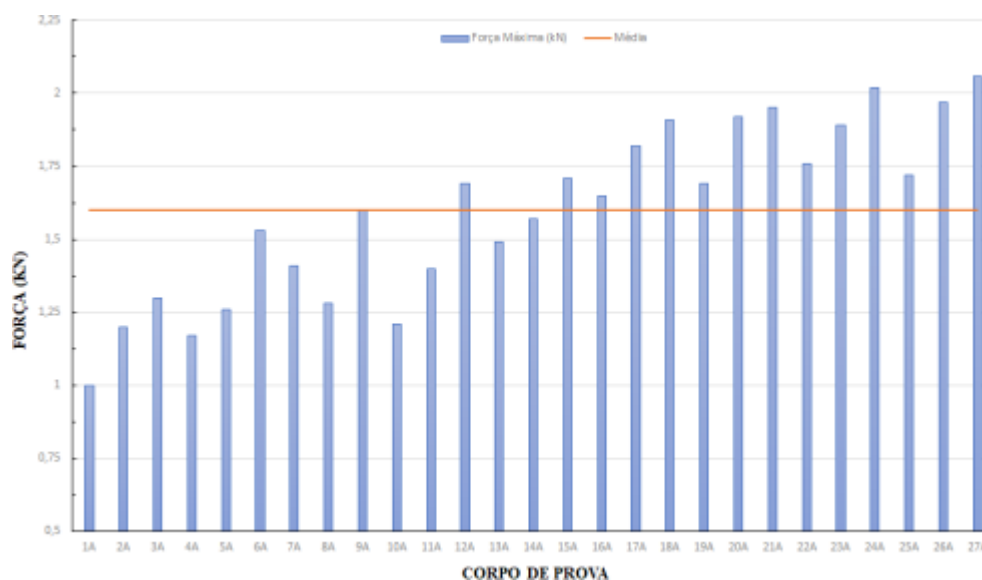
7A	1,41	25,76	0,84	440,83	97,25
8A	1,28	24,60	0,67	468,82	95,83
9A	1,60	30,38	1,09	486,53	96,27
10A	1,21	22,04	0,62	426,85	97,31
11A	1,40	26,24	0,71	495,12	95,31
12A	1,69	30,71	1,04	521,97	97,46
13A	1,49	26,53	0,80	473,55	96,15
14A	1,57	28,80	0,97	497,45	97,17
15A	1,71	32,38	1,12	486,95	96,52
16A	1,65	30,33	0,97	504,78	97,86
17A	1,82	34,16	1,24	519,12	94,70
18A	1,91	36,37	1,44	556,37	97,22
19A	1,69	30,93	0,97	518,45	96,49
20A	1,92	35,47	1,29	558,79	94,91
21A	1,95	35,54	1,17	571,95	95,77
22A	1,76	30,79	0,97	512,18	95,03
23A	1,89	34,05	1,25	527,81	95,80
24A	2,02	36,96	1,38	560,58	95,38
25A	1,72	30,26	1,22	513,89	95,80
26A	1,97	35,78	1,20	584,43	97,08
27A	2,06	37,70	1,32	570,10	96,78
$\bar{x}$	1,60	29,50	0,99	492,82	96,27
S	0,19	3,43	0,25	58,03	0,86

Fonte: AMBRÓS (2019).

Ambrós (2019) analisou que, de acordo com os resultados encontrados no ensaio de tração, demonstrado na Tabela 11, para o corpo de prova A1 com preenchimento de 10%, espessura de parede com 2 perímetros e altura entre camadas de 0,15 mm, resistiu somente a 1 kN sendo a menor força aplicada e teve um limite de resistência de 18,60MPa. Já o corpo de prova A27 com preenchimento de 50%, espessura de parede com 4 perímetros e altura entre camadas de 0,25 mm, resistiu a 2,06 kN sendo o maior carregamento suporte entre todos os corpos de prova analisados e obteve um limite de resistência de 37,70 MPa.

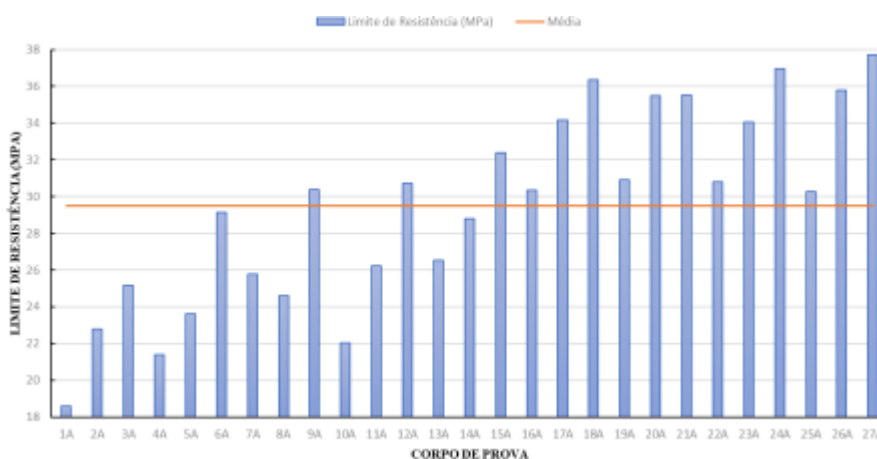
A Figura 22 apresenta o gráfico de colunas com todos CPs e suas respectivas forças máximas e média e na Figura 23 da mesma forma, porém com os valores limites de resistência.

Figura 22 - Gráfico de colunas de força máxima dos CPs ensaiados.



Fonte: AMBRÓS (2019).

Figura 23 - Gráfico de colunas limite de resistência dos CPs ensaiados.



Fonte: AMBRÓS (2019).

Para análise da influência do preenchimento, Ambrós (2019) mantendo os parâmetros de espessura de parede em 2 perímetros e altura entre camadas em 0,15 mm observou que ocorreu um aumento em força máxima de resistência à tração de 1 kN para 1,69 kN a partir da variação de preenchimento em 10% a 50%. Além de um aumento no limite de resistência à tração de 18,60 MPa para 30,93 MPa.

Essa característica como resposta ao ensaio de tração ocorreu em todas as combinações de mesmo perímetro e altura entre camadas, onde se teve um aumento da força e da resistência à tração com o aumento da porcentagem de preenchimento.

4.1.3 Trabalho de Shimano et al (2018)

Na Tabela 12, tem-se os resultados de força e deformação máximas e rigidez obtidos por Shimano et al. (2018). Nesta, observa-se que os valores médios de força máxima apresentaram discreta variação. Analisando-se os resultados de deformação, desta tabela, também se observa pequena variação nos valores médios dessa propriedade. Já quanto a rigidez, todos os grupos apresentaram diferenças consideráveis. Buscando analisar o poder de adesão entre as camadas, o ensaio de flexão apresentou o PLA com 30% de preenchimento com os maiores valores de força máxima e rigidez, seguido do PLA com 15%, ABS com 30% e o ABS com 15%.

Tabela 12 - Características mecânicas dos materiais utilizando teste de flexão em três

Grupos	Flexão em três pontos		
	Força máxima (N)	Deformação Máxima (mm)	Rigidez (N/mm)
PLA-15	435,8±31,5	1,08±0,11	456,6±16,0
PLA-30	516,2±37,6	1,05±0,07	539,2±26,0
ABS-15	262,0±37,3	0,81±0,14	364,3±16,2
ABS-30	289,0±37,3	0,81±0,07	401,1±20,0

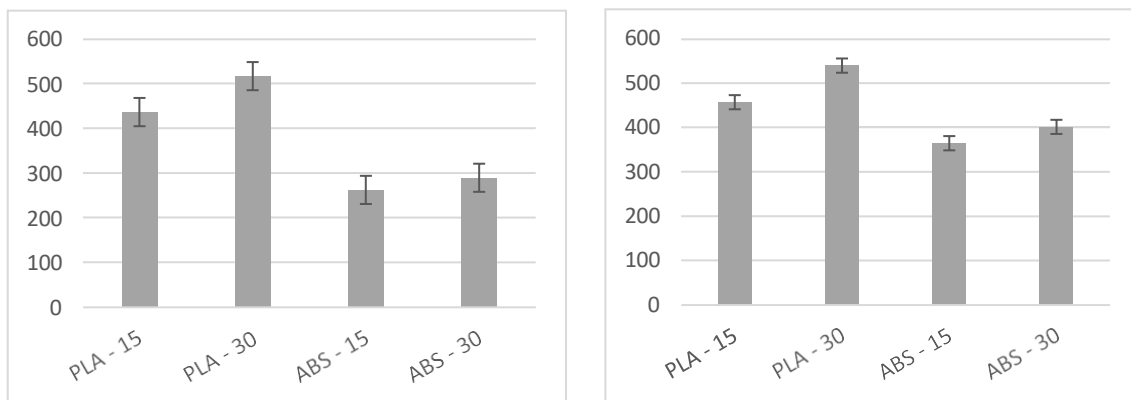
Fonte: SHIMANO et al. (2018).

Na Figura 24 (a) e (b) pode ser observado com mais clareza que a força máxima a rigidez do PLA 30% tem respostas superiores aos demais grupos no ensaio de flexão. Concluindo então que o PLA tem vantagem quando comparado ao ABS para os mesmos parâmetros no ensaio de flexão. Comparando-se os PLAs com 15% e 30% de preenchimento, verifica-se um aumento de força máxima e rigidez com o aumento do preenchimento, ou seja, o PLA 30% tem melhores resultados. Comportamento semelhante é observado para propriedade dos ABSs com 15% e 30% de preenchimento.

Figura 24 - Gráfico das características mecânicas dos materiais no teste de flexão.

(a) Forçamáxima (N)

(b) Rigidez (N/mm)



Fonte: AUTOR (2021).

4.1.4 Panorama dos resultados

Avaliando os resultados, temos que:

Cardinali (2018) com intuito de estudar as propriedades mecânicas dos corpos de prova de PLA, utilizando-se de ensaio de tração, observa uma grande influência da porcentagem de preenchimento no modulo de Young, na tensão de escoamento, na tensão de ruptura e na tenacidade.

Ambrós (2019) em seu trabalho conclui por meio de ensaio de tração e análise dos valores obtidos, que a resistência à tração tende a aumentar com o aumento da porcentagem de preenchimento.

Shimano (2018) conclui em seu trabalho, por meio de ensaio de flexão em três pontos, que a porcentagem de preenchimento influencia nas propriedades mecânicas do PLA como também do ABS, além de observar que o PLA demonstra valores maiores em resposta ao ensaio de flexão quando comparado ao ABS para as mesmas configurações de impressão.

Conforme a literatura, conclui-se que a porcentagem de preenchimento influencia diretamente em propriedades mecânicas de peças fabricadas por impressão 3D, onde a resistência mecânica é crescente de acordo com o aumento da porcentagem de preenchimento, como visto em todos os trabalhos.

Essa característica se deve a quantidade de material depositado, onde quanto maior a quantidade de material, maior área de contato e maiores ligações entre filamentos, acarretando assim a uma maior resistência ao esforço solicitado.

4.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DECORRENTES DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO DO ÂNGULO DE IMPRESSÃO

4.2.1 Trabalho de Santana et al (2018)

Santana et al. (2018), obteve alguns resultados em seu experimento, conforme Tabela 13, onde tem-se: a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)); a deformação na tensão máxima ($\epsilon_{\sigma_{m\acute{a}x}}$ (mm/mm)); o modulo Young (E (GPa)) e a medição da massa (g).

Tabela 13 - Resultados obtidos para o ensaio de tração e medição da massa.

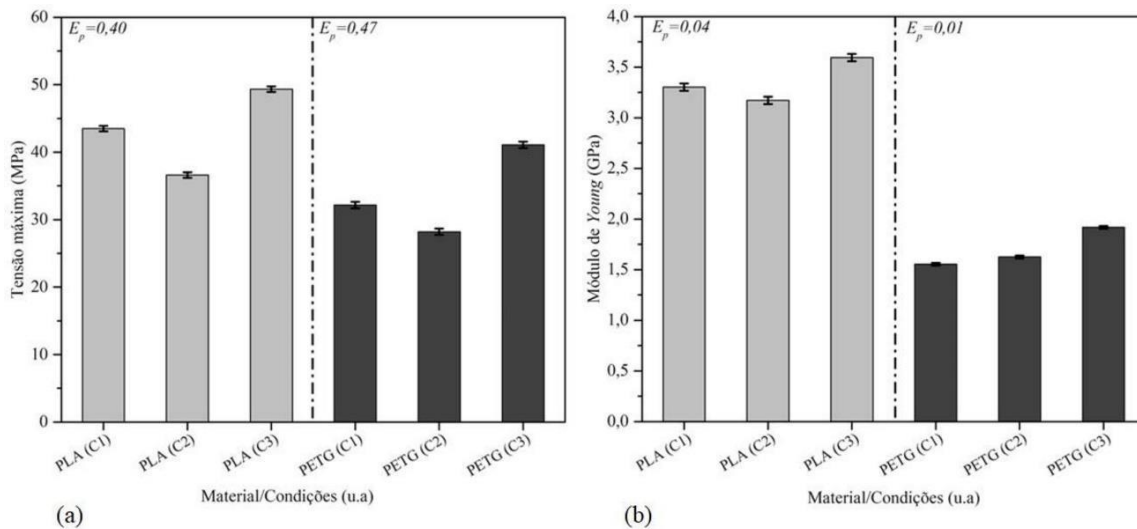
PROPRIEDADES	PLA (C1)	PLA (C2)	PLA (C3)	PETG (C1)	PETG (C2)	PETG (C3)
$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	43,50 ± 0,72	36,61 ± 0,80	49,34 ± 1,12	32,15 ± 0,67	28,21 ± 1,70	41,10 ± 0,14
$\epsilon_{\sigma_{m\acute{a}x}}$ (mm/mm)	0,02 ± 2,8E-4	0,01 ± 4,2E-4	0,01 ± 4,1E-4	0,03 ± 1,1E-3	0,02 ± 1,4E-3	0,03 ± 3,0E-4
E (GPa)	3,30 ± 0,12	3,17 ± 0,06	3,59 ± 0,03	1,55 ± 0,05	1,63 ± 0,02	1,92 ± 0,01
Massa (g)	10,18 ± 0,03	9,82 ± 0,05	9,90 ± 0,07	9,96 ± 0,08	9,81 ± 0,04	9,79 ± 0,02

Fonte: SANTANA et al. (2018).

Como o trabalho foi elaborado utilizando diferentes combinações paramétricas, Santana et al. (2018), avaliou os resultados estatisticamente por análise de variância (ANOVA). Esse tipo de análise tem como método comparar o arranjo de três ou mais grupos em amostras diferentes, desse modo, se contextualizando como uma aplicação da Anova, Santana et al. (2018) realizou testes estatísticos com objetivo de verificar se ocorre variação no comportamento mecânico a partir da distribuição do PLA e PETG em diferentes grupos de ângulo e varredura.

Santana et al., (2018), analisando o Gráfico 1 (a), a tensão máxima apresentou maiores resultados na condição 3 (Tabela 13), onde o ângulo de varredura foi unidirecional ($\hat{A}V=0^\circ$). Este resultado se deu devido ao processo de preenchimento ser na mesma direção e alinhamento em que ocorreu a aplicação de carga (axial) no ensaio de tração. Logo, as peças confeccionadas pela condição 3 com os filamentos distribuídos ao longo da direção axial, fez com que ocorresse um aumento significativo na sua capacidade de carga, onde é notado que a maior parte da força está distribuída ao longo de tais filamentos e não entre suas uniões.

Gráfico 1 - Média de tensão máxima (a) e do módulo de Young (b) em função dos níveis do ângulo de varredura.



Fonte: SANTANA et al. (2018).

Analisando ainda o Gráfico 1, estatisticamente, e comparando a condição C3 com as condições C1 e C2, tem-se alguns percentuais, como: Para ângulo de varredura em 45/-45°, a condição C3 apresenta uma resistência a tração 13% maior que na condição C1 no PLA e 28% maior que na condição C2 no PETG. E para ângulo de varredura em 0/90°, a condição C3 apresenta uma resistência a tração 35% maior que na C2 no PLA e 46% maior que na C2 no PETG. Observado assim a influência do ângulo de varredura no comportamento mecânico do PLA e do PETG.

Outro ponto a ser analisado foi uma relação entre a C1 e C2, onde na C2 por ser um ângulo de varredura de 0/90° apresenta somente 50% de sua estrutura com uma maior capacidade de suporta cargas a tração, pois metade de seu preenchimento dos filamentos está alinhado a mesma direção da aplicação de carga à tração, o que não ocorre na outra metade, assim a C1 tem resultados melhores quanto a tensão máxima quando comparado a C2.

Já quanto ao modulo de Young (elasticidade), Gráfico 1 (b) (Santana et al., 2018) os autores verificaram comportamento semelhante ao da tensão máxima, já que os valores máximos foram também observados para a condição 3 (unidirecional), ou seja, as peças confeccionadas com filamentos unidirecionais tendem a serem mais rígidas.

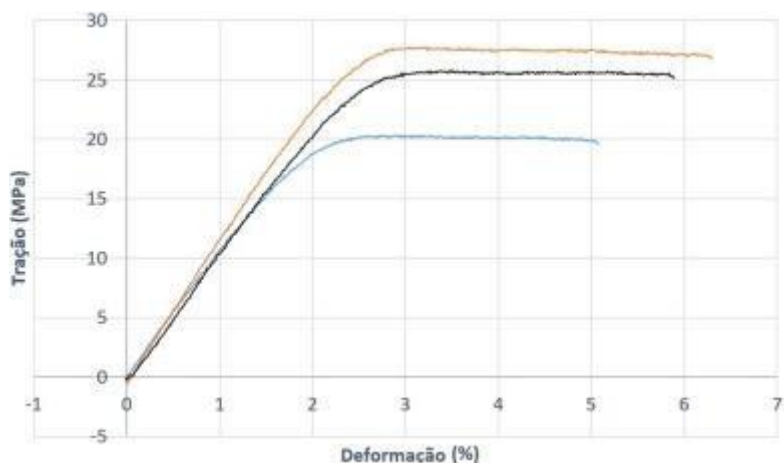
Verificou ainda que o PLA se demonstrou duas vezes mais rígido que o PETG (Gráfico 2 (b)) e o PETG por sua vez apresentou um crescimento constante no modulo de elasticidade de C1 para C2 para C3, diferentemente ao ocorrido no PLA.

Quando comparamos os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade, Gráficos 1 (a) e (b) respectivamente, para a condição 2, observa-se que nesta condição ambas as propriedades apresentam os menores valores, exceto o módulo de elasticidade do PETG (Gráfico 1 (b)). Os autores associaram esse resultado as zonas frágeis e a baixa capacidade de deformação, já que o preenchimento dos filamentos com 90° é perpendicular as cargas efetuadas no processo de ensaio de tração.

4.2.2 Trabalho de Oliveira (2019)

Iniciando pelos resultados do ensaio de tração em corpos de prova em ABS, tem-se como resposta na Figura 25 boa resistência mecânica quando impresso em ângulo de 0°. A carga máxima registrada foi de 20,3455MPa; 25,8144MPa e 27,7125MPa.

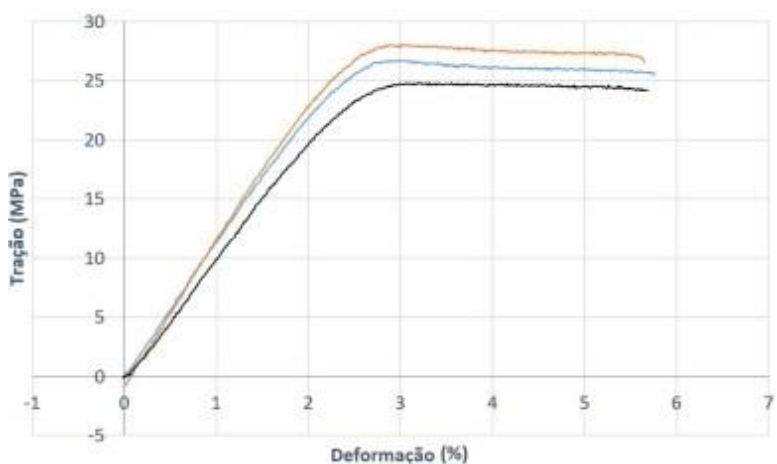
Figura 25 – Resistência mecânica dos corpos de prova em ABS impressos a 0°



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Já para os corpos de prova em ABS para 45°, Oliveira (2019) verifica uma resistência mecânica pouco maior mostrado na Figura 26, com 24,8440MPa; 26,7215MPa e 28,0426MPa.

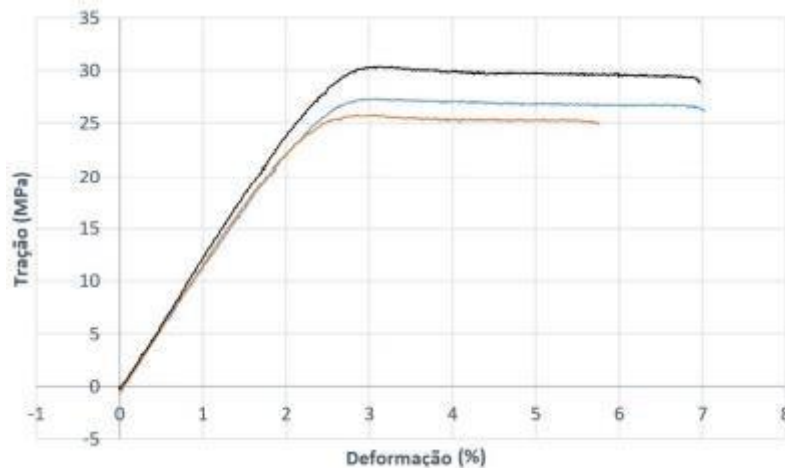
Figura 26 - Resistência mecânica dos corpos de prova em ABS impressos a 45°



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Ainda para ABS, Oliveira (2019) deteve os dados mostrados na Figura 27, onde para 90° os corpos de prova apresentaram 25,7495MPa; 27,3375MPa e 30,3704MPa como resistência mecânica.

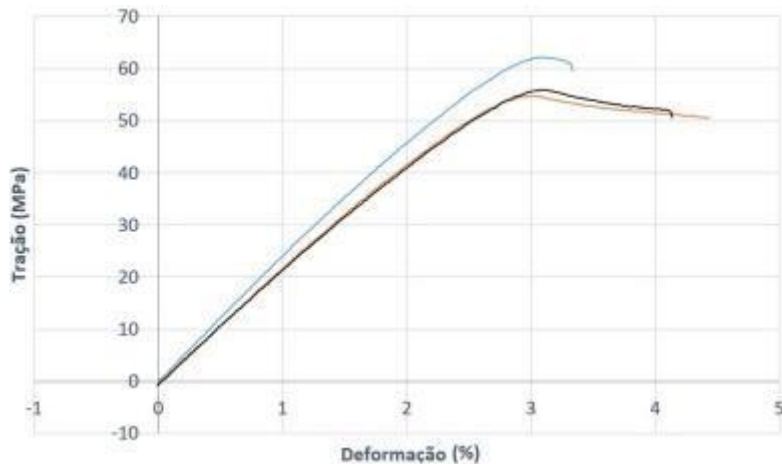
Figura 27 - Resistência mecânica dos corpos de prova em ABS impressos a 90°



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Oliveira (2019) trabalhando com PLA observa uma boa resistência mecânica e superior a resistência apresentada pelo ABS. Na Figura 28 é mostrado os resultados para o ensaio com ângulo de 0° e valores em 54,7780MPa; 55,9224MPa e 62,2694MPa.

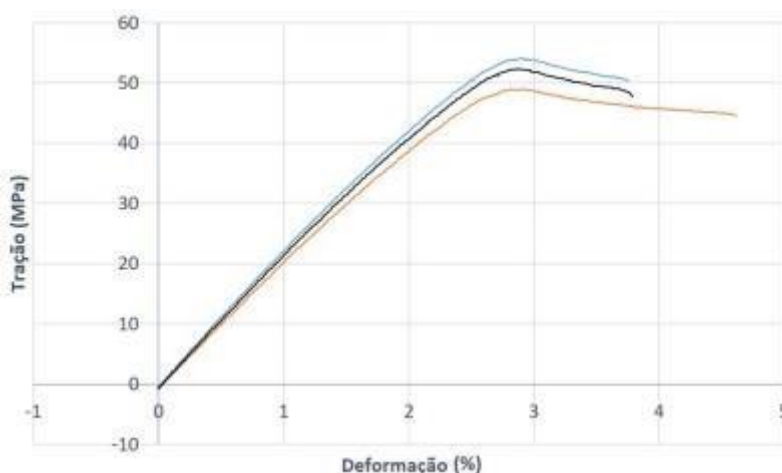
Figura 28 - Resistência mecânica dos corpos de prova em PLA impressos a 0°



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Já para o PLA a 45° é tido como resultados 48,9163MPa; 52,2879MPa e 54,0859MPa. Graficamente mostrado na Figura 29.

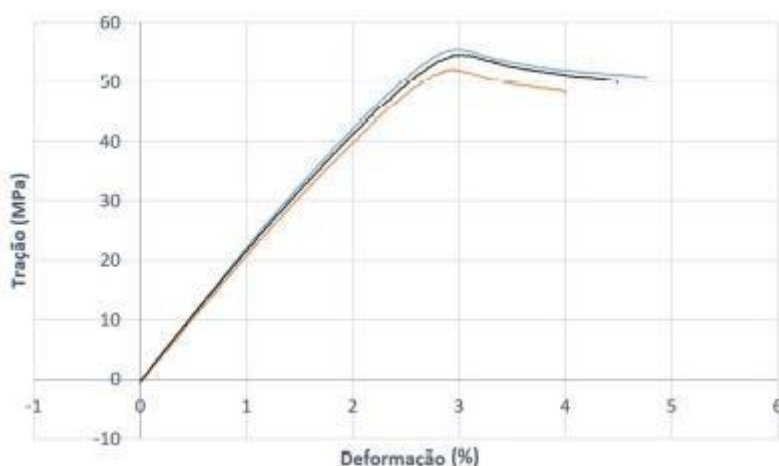
Figura 29 - Resistência mecânica dos corpos de prova em PLA impressos a 45°



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Oliveira (2019) conclui com o PLA a 90° com trações máximas em 52,033MPa; 54,5178MPa e 55,4245MPa como visto na Figura 30.

Figura 30 - Resistência mecânica dos corpos de prova em PLA impressos a 90°



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Oliveira (2019) relata que os resultados demonstrados das Figuras 25 a 30 apresentam um comportamento linear em seu início, se caracterizando a região elástica onde ocorre a deformação provocada pela tração progressivamente. A próxima região demonstrada é a região plástica, onde os resultados para o ABS mostram uma tendência do mesmo a se esticar mantendo a tração aproximadamente constante, já o PLA por sua vez apresenta uma diminuição na capacidade de carga à medida que se deforma plasticamente.

É observado ainda que, todos os gráficos indicam o fim do processo, onde ocorre o rompimento dos corpos de prova, representando a deformação máxima suportada.

E em uma visão geral, PLA apresenta maior resistência mecânica quando comparado ao ABS, suportando entre 40 e 65MPa enquanto o ABS suporta entre 20 e 30MPa.

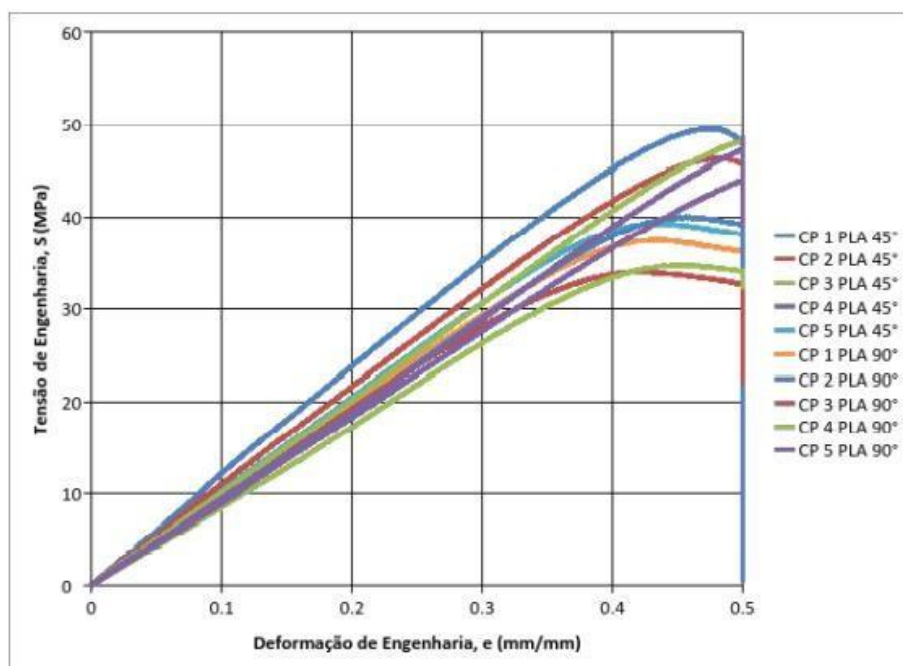
Oliveira (2019) conclui que ocorre uma influência do ângulo de impressão em resultados de resistência mecânica. Para o polímero ABS é visto que os corpos de prova impressos em 90° apresentam maior resistência mecânicas, além de maior alongamento quando comparado aos corpos de prova impressos em 0° e 45°, que aparentemente tem seus resultados muito próximos.

Já no caso do PLA é observado que o ângulo de preenchimento com 0° deteve os maiores valores em resposta ao ensaio de tração, chegando a ultrapassar 60MPa em uma das amostras. Seguido da angulação de 90° e 45° com valores distintos e comportamento elástico similar.

4.2.3 Trabalho de Moraes (2018)

Analisando os resultados da Figura 31, é visto que os corpos de prova confeccionados com ângulo de varredura em 90° respondem melhor ao ensaio de tração, logo, possuindo uma maior resistência comparado aos corpos de prova com ângulo de varredura em 45°. Esse fato se dá devido a maneira em que ocorre a deposição do material, sendo no mesmo sentido em que ocorre a tração axial no ensaio, oferecendo o máximo em resistência ao esforço solicitado (MORAIS, 2018).

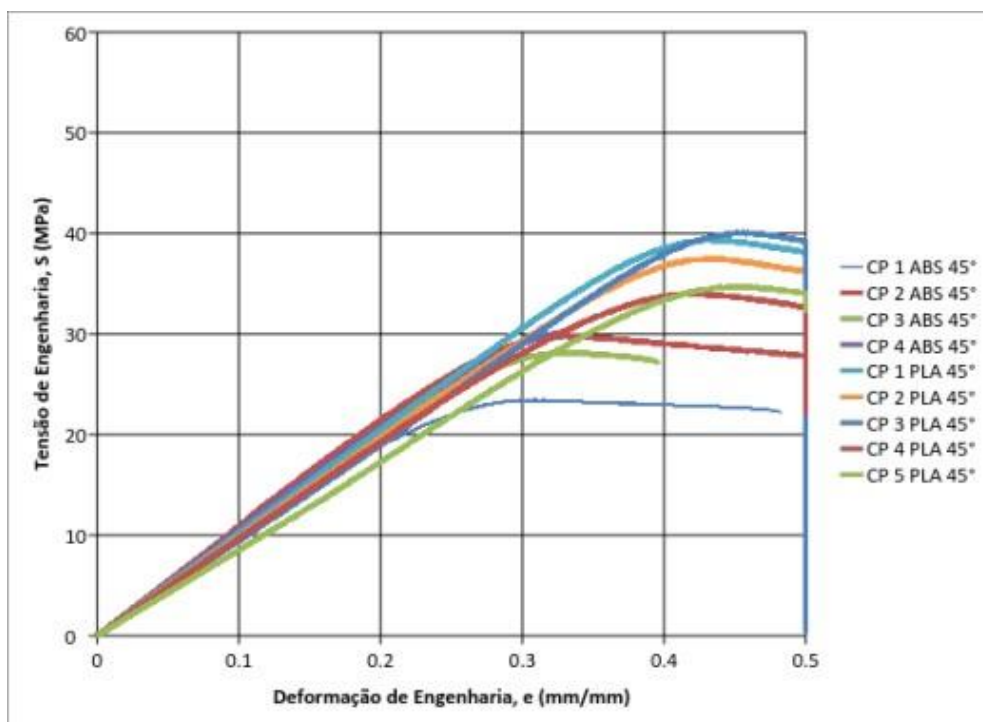
Figura 31 – Comparação de resultados entre corpos de prova em PLA impressos com orientação de infill a 45° e 90°.



Fonte: MORAIS (2018).

Na Figura 32, é apresentado uma comparação entre o PLA e ABS, onde tem-se os dois materiais impressos a 45°. Onde o PLA se mostra mais resistente a tração, com uma média de 37MPa, enquanto o ABS apresenta uma média de 27,8MPa (MORAIS, 2018).

Figura 32 – Comparação de resultados entre corpos de prova em PLA e ABS impressos com orientação de infill 45°.



Fonte: MORAIS (2018).

Com os dados obtidos, Moraes (2018) conclui que o PLA a 90° detém os maiores valores de tensão de deformação comparado ao PLA a 45°. Observar ainda que, o PLA a 45° apresenta uma resistência 25% maior que o ABS a 45° e o PLA a 90° é aproximadamente 21,27% maior em resistência que o PLA a 45°.

4.2.4 Panorama dos resultados

Santana (2018), realizando ensaios de tração com corpos de prova em PLA e PETG com diferentes ângulos de varredura, concluiu que o ângulo de varredura influenciou diretamente nas propriedades mecânicas dos corpos de prova, além de observar que o PLA teve os maiores valores quanto a tensão máxima quando comparado ao PETG.

Oliveira (2019) em seu trabalho conclui, por meio de ensaio de tração e corpos de prova em ABS e PLA em diferentes ângulos de preenchimento, que as angulações trabalhadas influenciam diretamente no comportamento mecânico de peças poliméricas confeccionadas por impressão tridimensional.

Morais (2018), analisando os dados obtidos em ensaio de tração. Observou que o ângulo de varredura influencia diretamente em propriedades mecânicas, além de observar que o PLA detém os maiores valores em tensão de deformação comparado ao ABS para os mesmos parâmetros de impressão.

Diante da análise da literatura, pode-se concluir que o ângulo de impressão influencia diretamente nas características mecânicas de corpos de prova impressos pela tecnologia tridimensional, onde os corpos de prova confeccionados em uma angulação que seja em mesmo sentido da ocorrência da tração axial, se beneficia e apresenta maiores valores aos ensaios trabalhados. É nítido também que o PLA se sobressai quando comparado ao ABS e PETG, onde o mesmo apresenta maior resistência com os mesmos parâmetros trabalhados.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DO PLA COM OUTROS MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS NA IMPRESSÃO 3D.

4.3.1 Trabalho de Bolelli et al (2019)

Como resultado, BOLELLI et al., (2019), conforme valores da Tabela 14, para o ensaio de tração, o PLA (branco, preto e cinza) se torna mais vantajoso quando comparado aos outros matérias, isto por apresentarem maiores valores de resistência.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios para o ensaio de tração.

Materiais	Tensões medias de tração (MPa)
PLA com cobre	35,09
PLA com alumínio	43,72
PLA com bronze	33,49
PLA com fibra de carbono	27,23
ABS condutivo	16,42
PETG	21,01
PLA branco	68,78
PLA preto	62,10
PLA cinza	62,14
ABS branco	41,00
ABS preto	33,23
ABS cinza	49,72
TPU	26,20

Fonte: BOLELLI et al. (2019).

O ensaio de flexão tem resultados semelhantes ao ensaio de tração, onde o PLA (branco, preto e cinza) é dominante aos maiores resultados, comparado aos outros materiais analisados. Como representado pela Tabela 15.

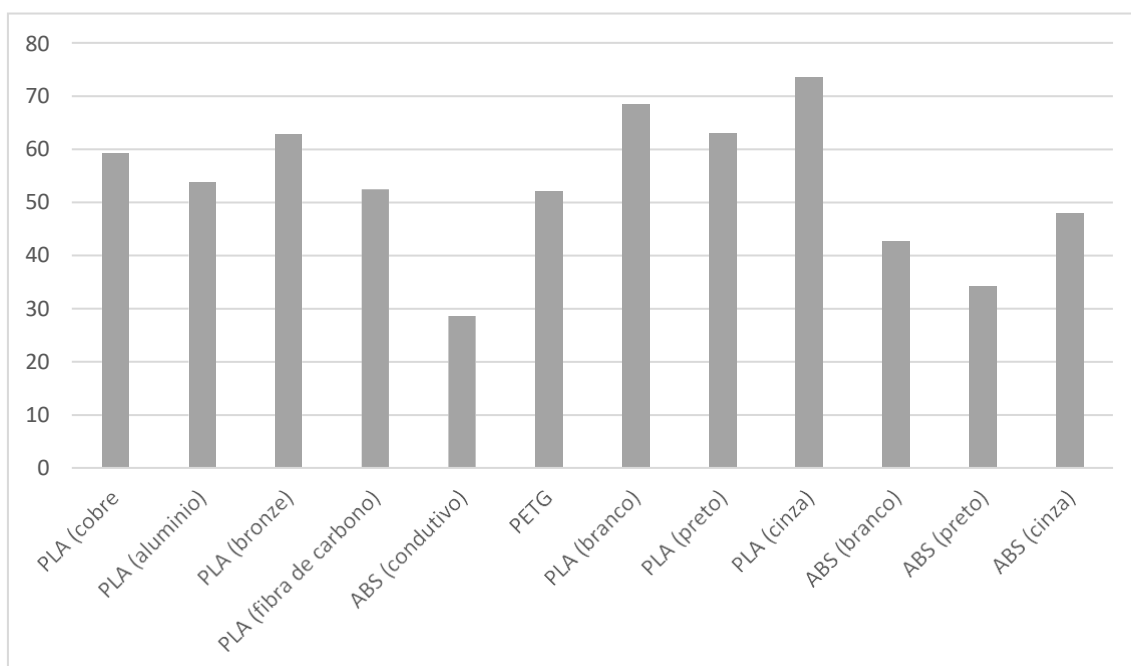
Tabela 15 - Resultados dos ensaios para o ensaio de flexão.

Materiais	Tensões medias de flexão (MPa)
PLA com cobre	59,23
PLA com alumínio	53,73
PLA com bronze	62,75
PLA om fibra de carbono	52,47
ABS condutivo	28,57
PETG	52,70
PLA branco	68,46
PLA preto	62,97
PLA cinza	73,42
ABS branco	42,63
ABS preto	34,12
ABS cinza	47,91

Fonte: BOLELLI et al. (2019).

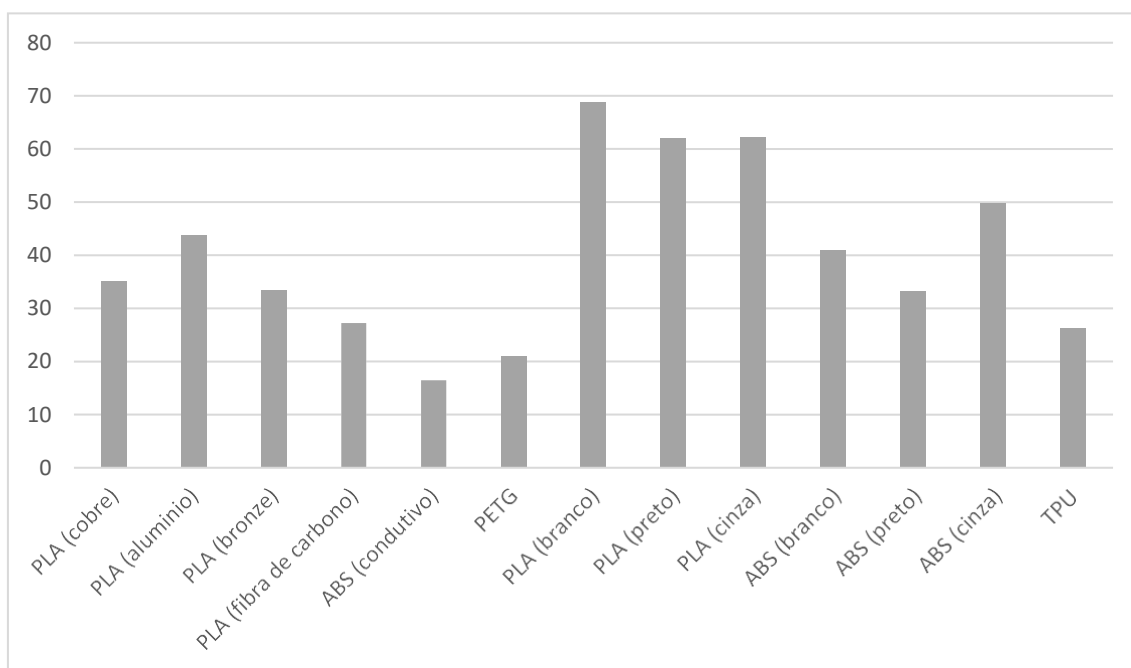
Como forma de melhor visualizar esses resultados, foram gerados os Gráficos 2 e 3, confirmando de maneira mais clara que o PLA (branco, preto e cinza) detém dos maiores resultados quando comparado a todos os outros materiais, tanto para o ensaio de tração como para o ensaio de flexão, até mesmo do próprio PLA quando associado a outros materiais como o cobre, alumínio, bronze e fibra de carbono. Lembrando que, todos os grupos amostrais foram submetidos aos mesmos parâmetros de impressão, e com 50% de densidade de preenchimento.

Gráfico 2 - Gráfico das tensões médias de flexão.



Fonte: AUTOR (2021).

Gráfico 3 - Gráfico das tensões médias de tração.



Fonte: AUTOR (2021).

Vale ressaltar ainda que, o PLA branco, preto e cinza estão na sua forma pigmentada, logo, é confirmado uma característica do PLA, onde a cor influencia nas propriedades mecânicas do material. Outra característica interessante é do ABS (branco, preto e cinza) ter resultados maiores do que o PETG para o ensaio de tração e inferiores no

ensaio de flexão, onde se torna visível uma característica específica do PETG que é a sua flexibilidade.

4.3.2 Trabalho de Peregrino et al (2019)

Com os resultados, peregrino (2019) observa que, pelas médias das tensões, onde de acordo com a Tabela 16 tem-se o PLA com 28MPa e pela Tabela 17 o ABS 29MPa, não se tem uma diferença significativa entre os materiais.

Tabela 16 - Resultados dos corpos de prova em ABS.

Corpo de prova	Tensão de força Máx (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Def. Especif. Ruptura (%)
CP1	29	23	6
CP2	36	34	6
CP3	31	29	6
CP4	32	29	5
CP5	29	27	6

Fonte: Peregrino (2019).

Tabela 17 - Resultados dos corpos de prova em PLA.

Corpo de prova	Tensão de força Máx (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Def. Especif. Ruptura (%)
CP1	29	25	2
CP2	34	29	4
CP3	33	28	3
CP4	43	36	4
CP5	28	25	3

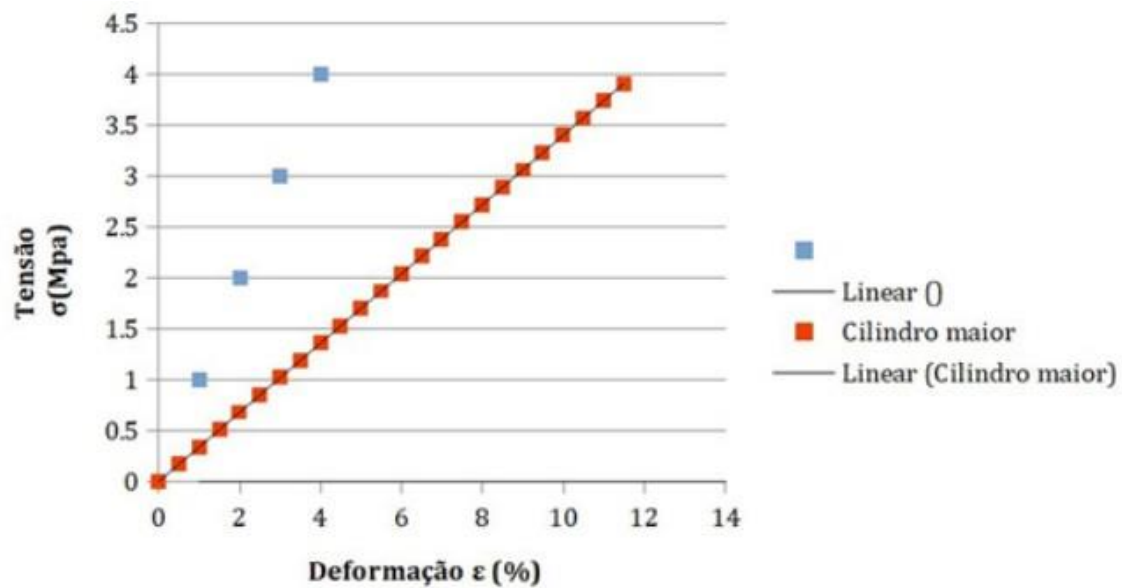
Fonte: Peregrino (2019).

O ABS, no entanto, apresenta uma ligeira vantagem sobre o PLA no quesito de qualidade de impressão e resistência a ruptura. Peregrino et al., (2019) não detalhou se durante a impressão algo caracterizou para ocorrer tal resultado, que é divergente dos outros estudos deste trabalho. Sendo que, uma propriedade que poderia ter influenciado, foi na quantidade de material depositado, onde de acordo com a literatura de Peregrino et al., (2019) o ABS se utilizou de 9,4g e o PLA com 8g, assim, quanto maior a quantidade de material, maior resistência se tem e melhor acabamento superficial.

4.3.3 Trabalho da Martinez (2019)

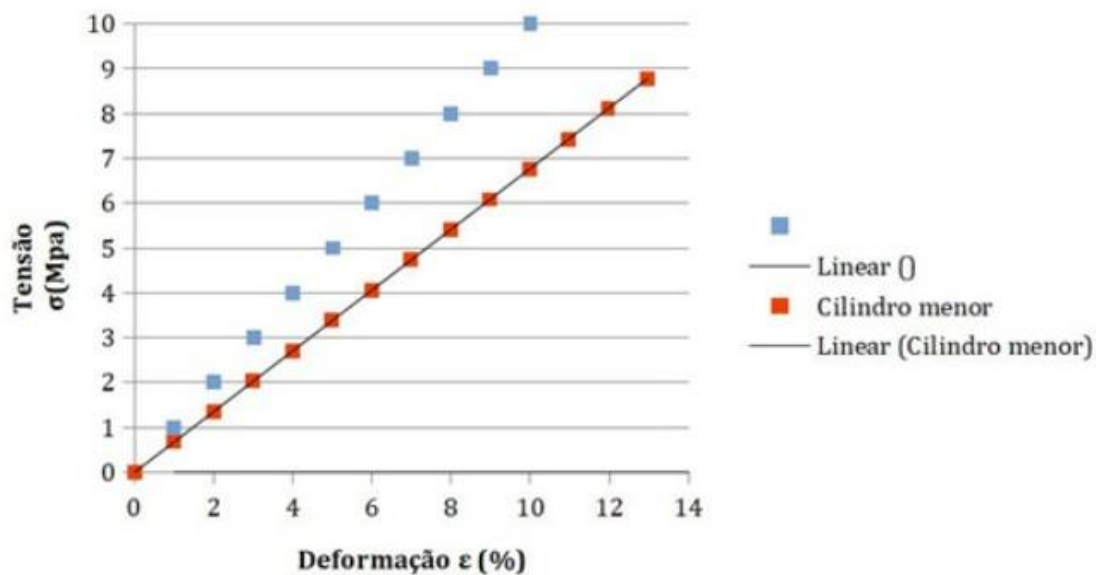
Para os corpos de prova com malha estrutural interna em ensaio de compressão axial, Martinez (2019) teve como resposta que tanto o PLA como o ABS apresentam um comportamento frágil representado pelo gráfico tensão-deformação (Gráficos 4 e 5), com falha sem deformação plástica aparente. Além de observar que o PLA tem uma variação maior entre os valores de módulo de elasticidade.

Gráfico 4 - Curva tensão de deformação para as amostras de PLA, com 0,50mm de espessura (P50).



Fonte: MARTINEZ (2019).

Gráfico 5 - Curva tensão de deformação para as amostras de ABS, com 0,50mm de espessura (A50).



Fonte: MARTINEZ (2019).

Já para o ensaio de flexão em três pontos, os corpos de prova com malha estrutural interna apresentaram diversas propriedades de resistência, como mostrado na Tabela 18. Logo, Martinez (2019), em seus testes verificou que o PLA possui resultados de

resistência muito superiores ao ABS em tensão de flexão de ruptura, momento fletor máximo, esforço cortante e tensão de cisalhamento.

Já o ABS possui desempenho superior em módulo de elasticidade e resultados semelhantes em momento de inércia e módulo de resistência.

Tabela 18 - Resultado para os ensaios de flexão. Onde CP=corpo de prova, P=carga, I=momento de inércia, M=momento fletor máximo, W=módulo de resistência, σ =tensão de flexão de ruptura, Q=carga variável, V=esforço cortante, τ =tensão tangencial ou cisalhamento.

CP	P (kN)	Área (cm ²)	I (cm ⁴)	$M_{f_{\max}}$ (kNxm)	W (cm ³)	σ (Mpa)	Q (cm ³)	V (kN)	τ (Mpa)
P25	2.08	6.36	5.05	4.62	3.27	13.85	4.91	1.04	4.80
P50	1.73	6.19	4.74	3.89	3.13	12.22	4.69	0.87	4.12
A25	0.76	6.28	4.92	1.69	3.21	5.18	4.82	0.38	1.78
A50	0.69	6.62	5.39	1.54	3.45	4.38	5.17	0.35	1.54

Fonte: MARTINEZ (2019).

Pelas análises dos corpos de prova maciços nos ensaios de compressão axial, Martinez (2019) observou o comportamento frágil de ambos os materiais (PLA e ABS) com os resultados apresentados e demonstrados na Tabela 19. Onde, o ABS teve um início de deformação em 7000kgf, chegando a uma carga final de 11000kgf.

Já o PLA, quando submetido a cargas maiores (próximo a 17000kgf), não sofre deformação significativa e apresenta uma maior resistência à compressão. Observado ainda que os valores em tensão para os corpos de prova do PLA aproximam-se de 90MPa e para o ABS em 50MPa.

Tabela 19 - Resultados de compressão axial para os corpos de prova em ABS e PLA.

Corpo de Prova	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd. (cm)	Área (cm ²)	H1 (cm)	H2 (cm)	Hméd. (cm)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)
A25	4,95	4,97	4,96	19,32	9,97	9,99	9,98	11070	57,29
A10	5,00	4,98	4,99	19,56	9,70	9,67	9,69	11470	58,65
A50	4,94	4,97	4,96	19,28	10,00	9,98	9,99	10900	56,53
P50	5,00	4,96	4,98	19,48	10,10	10,15	10,13	17640	90,56
A25	2,47	2,47	2,47	4,79	4,98	4,97	4,98	2763	57,67
A10	2,47	2,49	2,48	4,83	4,99	4,99	4,99	2227	46,11
A50	2,46	2,48	2,47	4,79	5,08	5,07	5,08	1775	37,04
P25	2,46	2,50	2,48	4,83	5,05	5,05	5,05	4180	86,53
P10	2,50	2,50	2,50	4,91	4,80	4,80	4,80	4560	92,90
P50	2,50	2,52	2,51	4,95	5,06	5,05	5,06	4290	86,70

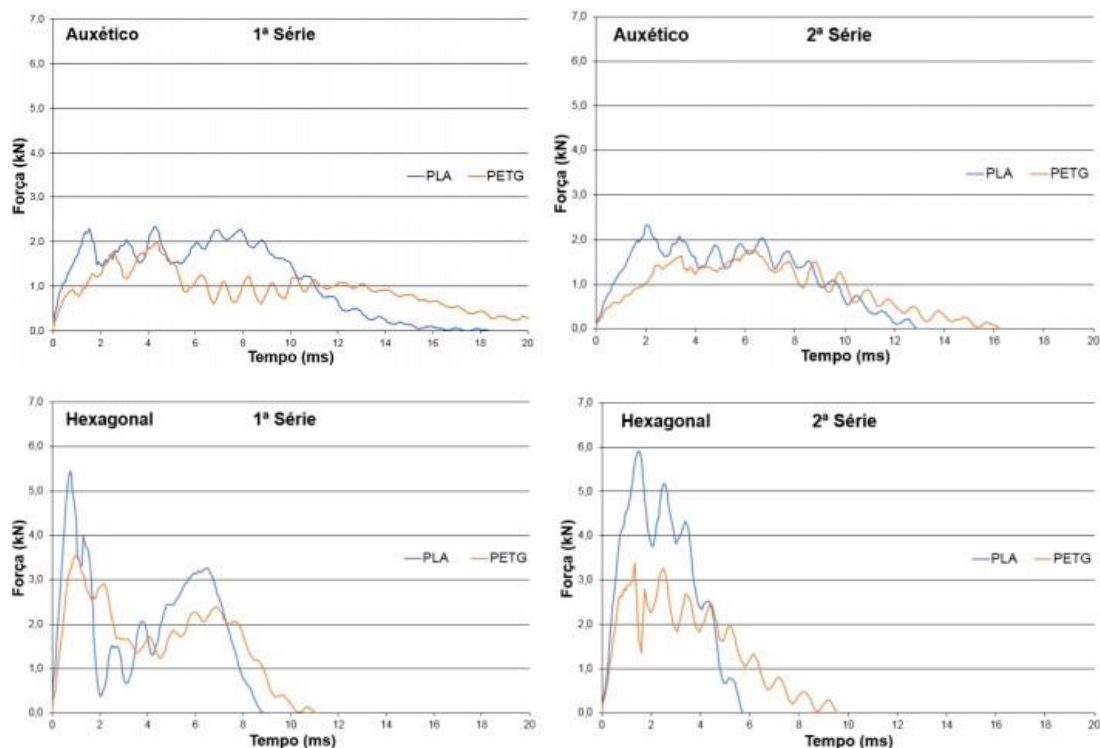
Fonte: MARTINEZ (2019).

4.3.4 Trabalho do Coutinho (2019)

Como resultado, Coutinho (2019) analisa o comportamento dos dois materiais em resposta ao ensaio de impacto. Na Figura 33, estuda-se a força na interface entre o pêndulo e o provete. Logo, observa-se que o PLA tem um aumento em força mais rápido quando comparado ao PETG em todos os gráficos, além de maiores valores.

Observa-se ainda que o máximo do PETG é inferior ao do PLA, e agregado ao maior tempo em que o PETG apresenta em contato com o pêndulo, o PETG possui como característica uma absorção mais gradual do impacto, com uma dissipação de energia superior.

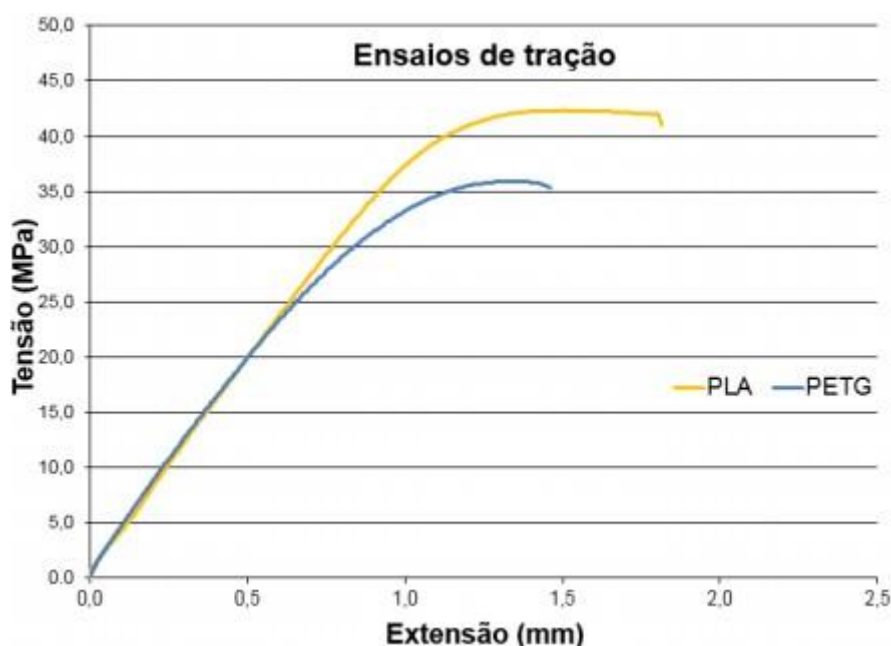
Figura 33 - Comparação da força atuante sobre cada material ao longo do tempo do ensaio experimental.



Fonte: Coutinho (2019).

Como resultado do ensaio de tração, Coutinho (2019) obteve a Figura 34 como média dos ensaios para os corpos de prova em PLA e PETG. Logo, o PLA apresenta como característica valores maiores em resistência máxima, e é um material mais frágil. Já o PETG apresenta um comportamento mais dúctil, e como apresentado no ensaio de impacto, tem por característica também uma quebra mais gradual e menos repentina.

Figura 34 - Comparação dos valores das tensões dos dois materiais ensaiados.



Fonte: Coutinho (2019).

4.3.5 Panorama dos resultados

Bolleli (2019) por meio de ensaios de tração e flexão em três pontos, observou que o PLA deteve os maiores valores como respostas a tais ensaios quando comparado ao ABS e PETG.

Coutinho (2019), em seu trabalho estuda o comportamento mecânico do PLA e do PETG em resposta ao ensaio de impacto e de tração. Concluindo logo que, o PLA é uma opção mais viável quando se quer trabalhar em caso que necessite de alto impacto, mesmo não possuindo uma alta capacidade de deformação.

Peregrino (2019) trabalhando com ABS e PLA em ensaio de tração, conclui em seu estudo que o ABS apresenta uma pequena vantagem em comparação ao PLA em resistência a ruptura e qualidade de impressão.

Martinez (2019), realizando ensaio de compressão axial e flexão em três pontos, conclui que em resistência o PLA obtém valores maiores como resposta aos ensaios quando comparado ao ABS.

Em virtude do que foi mencionado pelos autores, entende-se que o PLA é o material que mais se destaca em comparação a outros materiais, tais como ABS e o PETG. Pois além da sua principal característica ser um material biodegradável, propriedade essa que outros materiais não apresentam, o PLA expõe ótimas propriedades mecânicas, com

resultados superiores diante os ensaios experimentais em comparação a materiais comumente utilizados na tecnologia tridimensional.

Um ponto que vale ressaltar é o resultado do trabalho de Peregrino (2019), onde se opôs aos resultados dos outros autores, pois essa contradição pode ser justificada pelo fato de ter trabalhado com quantidade de material depositado diferente, acarretando assim uma possível influência no resultado final. Pois, de acordo com a literatura, quanto maior a quantidade de material depositado, a tendência é se ter uma maior resistência mecânica, logo, o ABS foi fabricado com 9,4g e o PLA com 8g de material.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho se propôs, como objetivo geral, a realização da análise de artigos científicos, sobre a impressão 3D e a influência de parâmetros de impressão na confecção de peças fabricadas a partir do PLA e de outros materiais comumente utilizados, demonstrar ainda que essa tecnologia é uma alternativa viável atualmente, tendo em vista que a matéria-prima em sua maioria é reciclável e indica uma baixa taxa de desperdício em todo o processo de confecção de peças, diferentemente como ocorre na realização de outros processos de fabricação, onde os resíduos são perceptíveis em sua maioria.

Por esses motivos, torna-se uma produção viável e que se encaixa nos padrões de sustentabilidade. Mesmo uma opção ainda pouco explorada, os resultados apresentados mostram que é possível projetar peças de maneira confiável com o processo de manufatura aditiva, visto que o conhecimento do comportamento mecânico é de fundamental importância nesse quesito.

É concluído em todos os estudos analisados que a porcentagem de preenchimento é um fator que influencia diretamente no comportamento mecânico de peças fabricadas por impressão tridimensional. De modo que, quanto maior for a porcentagem de preenchimento, maior será a resistência mecânica do corpo de prova.

O ângulo de preenchimento, em análise é verificada uma influência direta em propriedades mecânicas. Influenciando no comportamento estrutural de corpos de prova expostos a ensaios mecânicos, de acordo com a angulação em que são alinhados a tração axial. E foi visto que, quando ocorre o depósito de material no mesmo sentido e direção do ensaio de tração, em 0°, maior a resistência desse material em comparação as angulações de 45° e 90°.

Dentre os materiais utilizados na impressão 3D, o PLA se demonstrou o mais viável em comparação ao ABS e o PETG, por ser um material termoplástico biodegradável e por apresentar melhores respostas a ensaios mecânicos, estudados nos trabalhos analisados.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- O estudo teórico e prático da influência de outros parâmetros para o processo de impressão tridimensional, tais como velocidade de preenchimento, espessura entre camadas...
- O estudo e realização de ensaios comparado a utilização de diferentes termoplásticos.
- O estudo sobre a utilização de blendas poliméricas.
- O estudo da influência de diferentes cores em corpos de prova fabricados em PLA.
- O estudo da influência de diferentes tipos, modelos de impressoras 3D.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRÓS, G. S. **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e depósito.** Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2019.

BESKO, M. et al. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D.** Revista eletrônica dos cursos de engenharia. Gestão, tecnologia e inovação. V.01, n. 3, 2017.

BOLELLI, R.M. LEBRÃO, G.W. **avaliação das propriedades de material produzido por FDM em impressora 3D.** Iniciação científica da escola de engenharia mauá. EEM/CEUN/IMT, 2019

CARDINALI, J. **Avaliação das propriedades mecânicas de corpos de prova de PLA com diferentes cores obtidos por processo aditivo por extrusão.** Projeto de graduação (Engenharia de materiais e manufatura) – Universidade de São Paulo/Escola de engenharia de São Carlos, 2018.

CASAGRANDE, T. **Influência da cor no poli (ácido láctico) em peças obtidas pelo processo de modelagem por fusão e deposição.** Projeto de graduação (engenharia automotiva – Universidade Federal de Santa Catarina/Centro Tecnológico de Joinville, 2018.

CHUA, C. et al. **Rapid Prototyping: Principles and Applications.** 3. ed. Singapura: World Scientific Publishing, 2010. ISBN 978-981-277- 897-0.

COUTINHO, R. R. T. P. **Avaliação dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de peças de PLA/PBAT fabricadas por impressão 3D.** Projeto de Graduação (Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2017.

COUTINHO, M. L. A. N. P. **Mitigação de impactos com estruturas auxéticas impressas em 3-D**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de estruturas. Faculdade de Ciência e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa. Nov. 2019.

FERNANDES, J. F. M. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Técnico Lisboa, 2016.

FILHO, E. R.; NAVEIRO, R. M. **Uso de modelos e protótipos no projeto de productos**. In: FERREIRA, Cristiano Vasconcelos et al. Projeto do produto. Coord.: Eduardo Romeiro Filho. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011. ISBN 978-85-352-5191-3.

LIU, et al. **Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based pla composites fabricated by fdm**. Journal Of Materials Research And Technology, [s.l.], jul. 2019. Elsevier BV.

MARTINEZ, A, C. P. et al. **Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural**. *Gestão e Tecnologia de projetos*, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 125-141, set., 2019.

MENTA, E. et al. **Impressão 3D: Imaginar, planejar e materializar**. Secretaria de Estado da Educação do Paraná – Departamento de políticas e tecnologias educacionais. Paraná, 2018.

MORAIS, W. A. et al. **Estudo de materiais aplicados em uma impressora 3d open source**. Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP campus Guarujá / Universidade Santa Cecília – UNISANTA. 2018

OLIVEIRA, D. S. C. **Efeito do ângulo de impressão nas propriedades elétricas e mecânicas e peças poliméricas impressas em 3D**. Projeto de graduação (Licenciado em química) – Faculdade de ciências exatas e tecnologia da Universidade federal do Pará, campus universitário de Abaetetuba. 2019

PEREGRINO, A. N. et al. **Comparação de direção de impressão 3D em ABS e PLA produzidos pelo método FDM.** Memorial TCC – caderno da graduação. FAE Centro Universitário / Núcleo de Pesquisa Acadêmica – NPA. 2019

PORTO, T. M. S. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil.** Projeto de Graduação (Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2016.

SANTANA, L. et al. **Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica.** *Matéria*, Rio de Janeiro, vol. 23, n. 4, dez., 2018.

SANTOS, L. M. et al. **Tipos de polímeros utilizados como materia prima no método de manufatura aditiva por FDM: Uma abordagem conceitual.** ENEGEP – Encontro nacional de engenharia de produção. Maceió/AL, out., 2018.

SHIMANO, M. M. et al. **Influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico de peças em PLA e ABS obtidas por impressão 3D por extrusão.** RBCTI – Revista brasileira de ciência, tecnologia e inovação. Uberaba/MG, vol. 3, n.2, jul./dez., 2018.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** Editora Blucher. 2017.